



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAGLIARI

Dipartimento di Ingegneria del Territorio

*DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DEL  
TERRITORIO  
XX CICLO*

TESI DI DOTTORATO

**SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA PER LA  
VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DI UNA RETE  
STRADALE**

COORDINATORE

Prof. Ing. Giorgio Querzoli

TUTORI

Prof. Ing. Francesco Annunziata

Dott. Ing. Francesca Maltinti

DOTTORANDO

Ing. Melis Daniela



*A Carlo e a tutta la mia famiglia*



## **RINGRAZIAMENTI**

*Un sentito ringraziamento va ai miei tutori di dottorato, il prof. ing. Francesco Annunziata e l'ing. Francesca Maltinti, per i loro preziosi suggerimenti, il loro impagabile aiuto, il loro supporto e la loro pazienza. Un grazie anche a tutto il gruppo di Strade dell'Università degli Studi di Cagliari, nelle persone del prof ing. Mauro Coni, dell'ing. Silvia Portas e dell'ing. Francesco Pinna, per la loro partecipazione e disponibilità costante. Infine un particolare grazie va all'ing. Claudia Piras, compagna e amica in questo percorso di studi, e a Vania Carta, per il preziosissimo aiuto prestato nella fase di elaborazione dei dati.*



# INDICE

INDICE .....	I
PREMESSA .....	1
OBIETTIVI .....	2
1. VIABILITÀ E PROTEZIONE CIVILE: INDIVIDUAZIONE DEL RISCHIO SULLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO.....	6
1.1. La protezione civile in Italia. ....	6
1.2. Programmazione e pianificazione di protezione civile. ....	7
1.3. La gestione delle emergenze. ....	13
1.4. Il sistema dei trasporti come lifelines. ....	19
1.5. I rischi sulle infrastrutture di trasporto.....	20
1.6. Equazione del rischio. ....	21
1.7. Valutazione della pericolosità. ....	25
1.8. Valutazione dell'esposizione. ....	27
2. VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA' .....	32
2.1. Le definizioni di vulnerabilità.....	32
2.2. Metodologie per la valutazione della vulnerabilità.....	40
2.3. Spunti per la ricerca .....	58
3. STUDIO DELLA VULNERABILITA' DI UNA INFRASTRUTTURA STRADALE AL RISCHIO IDROGEOLOGICO. ....	61
3.1. Introduzione alla metodologia: il concetto di vulnerabilità. ....	61
3.2. Approccio analitico proposto .....	63
3.2.1. Le misure di vulnerabilità proposte .....	68
3.2.2. Calcolo dei percorsi minimi: l'uso di Arcview Network Analyst.....	75
4. UN ESEMPIO APPLICATIVO: STUDIO DELLA VULNERABILITÀ DELLA RETE VIARIA DELLA PROVINCIA D'OGLIASTRA .....	81
4.1. La provincia d'ogliastra: analisi del territorio e della rete stradale.....	81
4.2. Analisi dei risultati .....	91
4.3. Confronto con alcuni indici presenti in letteratura.....	103
5. RICERCHE FUTURE .....	112
6. CONCLUSIONI.....	115

APPENDICE: CHECK LIST PER LA VALUTAZIONE SPEDITIVA DELLA VULNERABILITÀ IDROGEOLOGICA LUNGO TRINCEE E RILEVATI.....	119
BIBLIOGRAFIA: .....	134



## **PREMESSA.**

Il processo di gestione del patrimonio stradale può anche intendersi come un metodo sistematico che possiede tra i propri fini la manutenzione, la riqualificazione e l'esercizio delle infrastrutture esistenti. All'interno di tali fasi si intende porre particolare attenzione sulla necessità di introdurre il concetto di "protezione civile", o più in generale di pianificazione, progettazione, realizzazione e manutenzione di un sistema stradale che possa essere il più possibile affidabile in condizioni di emergenza.

Il lavoro nasce dalla considerazione condivisa che le infrastrutture di trasporto costituiscono un elemento fondamentale per lo sviluppo economico e sociale, da tutelare anche dagli effetti delle calamità naturali. Le reti viarie assumono un ruolo estremamente importante e delicato nella gestione delle emergenze. Infatti, numerose esperienze hanno evidenziato che l'inefficienza del sistema viario, in condizioni di emergenza, può causare danni sui sistemi antropici, di entità addirittura paragonabile a quelli provocati dagli eventi calamitosi, proprio a causa dei ritardi nelle operazioni di soccorso. Questo aspetto è stato lungamente trascurato nella progettazione/costruzione/manutenzione delle reti viarie, sicché oggi si rende indispensabile una valutazione preventiva dei rischi sulle infrastrutture esistenti, al fine di pianificare gli opportuni interventi di adeguamento della rete e di predisporre programmi di attuazione.

In quest'ottica gli argomenti trattati acquistano un'importanza fondamentale se si considera che, allo stato attuale, il sistema infrastrutturale risulta essere, spesso, estremamente vulnerabile nei confronti degli eventi naturali calamitosi che si verificano periodicamente provocando danni notevoli, con effetti che si ripercuotono in maniera significativa sullo sviluppo socio-economico del Paese stesso.

## OBIETTIVI

È opinione condivisa il fatto che i disastri e i rischi di origine naturale e antropica abbiano gravi ripercussioni e impatti notevoli sul territorio e sulla popolazione insediata. Basti pensare ai terremoti disastrosi verificatisi in California (1994) e Giappone (Kobe, 1995), ma anche alle più recenti alluvioni in Italia (Sarno, 1998) o alle recenti forme di rischio, come quello terroristico (New York, 2001). È altrettanto condivisa l'opinione che i sistemi di trasporto, e in particolare le infrastrutture stradali, in tali condizioni critiche giochino un ruolo fondamentale per i soccorsi, e spesso, proprio il sistema dei trasporti è causa delle perdite maggiori, in termini di vite umane.

Tuttavia l'attenzione e lo studio dell'affidabilità delle infrastrutture di trasporto e della loro vulnerabilità si è sviluppato solo di recente.

Nel presente lavoro di tesi è stata introdotta e sviluppata una metodologia e degli indici per la valutazione della vulnerabilità dei diversi rami costituenti una rete stradale, con particolare riferimento ai rischi di natura idrogeologica.

La prima parte del lavoro di dottorato ha consistito nel recupero e nell'analisi della bibliografia scientifica del settore. Essendo l'argomento piuttosto vasto in un primo momento è stata analizzata l'organizzazione del sistema di Protezione Civile in Italia e alcuni Piani di Protezione Civile esistenti, con la finalità di mettere in evidenza il ruolo attualmente svolto dalle infrastrutture di trasporto. Si è poi analizzata la bibliografia esistente sullo studio dei rischi naturali con riferimento alle infrastrutture stradali. Il livello di rischio, in questo caso, viene calcolato mediante il prodotto di tre fattori: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. Di tali tre fattori lo studio della vulnerabilità attiene maggiormente la configurazione di una rete stradale, o riguarda nello specifico gli elementi strutturali costituenti un tronco stradale o un singolo manufatto. Per questa ragione si è concentrata l'attenzione sull'analisi bibliografica di lavori attinenti la valutazione della vulnerabilità. Tale analisi ha messo in evidenza come non esista una definizione comunemente accettata di vulnerabilità e anche che esistono diverse metodologie per valutarla, sia a livello di rete, che a un livello di dettaglio superiore.

Prendendo spunto dalle conclusioni emerse dall'analisi bibliografica è stata elaborata una metodologia e un indice per la valutazione della vulnerabilità di archi

stradali di un rete esposti al rischio idrogeologico (frane e piene). Tale indice è dato dalla somma di tre indicatori che tengono conto delle conseguenze sul territorio date dalla chiusura dell'arco, della centralità rivestita dall'arco per i collegamenti interni a una regione, e dalla possibilità che quell'arco ha di essere utilizzato dai mezzi di soccorso.

Infine l'indice di vulnerabilità è stato valutato sugli archi di una rete stradale esistente: quella della Provincia d'Ogliastra, in Sardegna. I risultati sono stati ottenuti e rappresentati mediante l'ausilio del GIS. Si è anche effettuato un confronto indici dedotti dalla letteratura scientifica.

Nella fase di individuazione della metodologia si è ritenuto necessario esplicitare degli obiettivi a cui andava ricondotto il lavoro di tesi.

Un obiettivo dato alla ricerca è stato la realizzazione di una metodologia che potesse essere utilizzabile dalla stessa Protezione Civile, per eventualmente migliorarne le operazioni di gestione delle emergenze. Infatti, all'interno dei Piani di Protezione Civile [19] deve essere indicata la viabilità di emergenza, diversificata in base alla funzione svolta sul territorio. Tuttavia le reali condizioni di affidabilità della strada non vengono indagate, in questo senso la conoscenza della vulnerabilità delle strade, sia a livello di rete, che eventualmente di dettaglio del singolo tronco, potrebbe costituire un utile strumento ad integrazione dei piani suddetti.

Altro obiettivo che ci si propone è quello di sviluppare una metodologia di analisi di vulnerabilità che possa essere utilizzata anche dagli Enti proprietari delle strade. Gli utilizzi degli studi di vulnerabilità della rete esistente che in questo caso potrebbero essere fatti, possono essere molteplici. A titolo di esempio l'identificazione dei tronchi maggiormente vulnerabili all'interno di una rete potrebbe fornire un ordine di priorità per l'allocazione delle risorse finanziarie destinate ad interventi di manutenzione ordinaria o straordinaria. Risulterebbe utile assegnare ad ogni arco della rete una misura della sua importanza, valutata in termini in ripercussioni che la chiusura di tale arco potrebbe avere sul territorio. In questo senso è chiaro come una priorità dovrebbe essere attribuita alla manutenzione o all'adeguamento di quegli archi stradali che garantiscono la comunicazione per la maggior parte della popolazione residente in un'area. Si tratta quindi di archi che vengono condivisi da più itinerari colleganti diversi poli: ottimizzare le risorse in questo senso significherebbe spenderle a beneficio di più utenti. D'altra parte le risorse per la manutenzione, o per eventuali interventi di adeguamento

dovrebbero essere destinate a quelle strade, o a quelle parti di strade, dove risultano maggiormente carenti le caratteristiche geometriche e di progetto di queste ultime. A tale proposito risulterebbe utile un indice di vulnerabilità che permetta di identificare un arco stradale sia in termini di carenze progettuali e geometriche sia in termini di importanza rivestita all'interno di un territorio. Inoltre, l'identificazione del livello di vulnerabilità che caratterizza una rete stradale fornirebbe, sempre agli Enti proprietari e gestori, uno strumento necessario per la gestione informata dei rischi sulle strade.

Altro obiettivo posto alla base dello sviluppo della metodologia di ricerca è quello di introdurre il concetto di vulnerabilità ai rischi naturali all'interno di un programma di riassetto di una rete stradale. Infatti, all'interno di un processo di adeguamento della rete stradale esistente, uno dei passi fondamentali da svolgere è l'identificazione degli obiettivi cui andrà finalizzata la progettazione e la realizzazione degli interventi di adeguamento. In realtà gli obiettivi che vengono considerati in questi casi sono principalmente di due tipi: obiettivi di sicurezza della circolazione e obiettivi di funzionalità operativa (Norme per gli interventi di adeguamento delle strade esistenti, bozza del 2006). Gli obiettivi di funzionalità operativa si riferiscono principalmente al livello di servizio caratterizzante un'infrastruttura stradale, per cui rientrano in questa categoria tutti quelli interventi volti ad incrementare quest'ultimo. Gli obiettivi di sicurezza della circolazione sono quelli invece tesi ad aumentare la sicurezza intrinseca di una infrastruttura stradale. Detto ciò, accanto a questi obiettivi, che si possono considerare basilari e tradizionali, possono esserne individuati altri. Ad esempio, potrebbe essere considerata l'opportunità di porre come obiettivo la riduzione della vulnerabilità ad eventi naturali insistente sulle strade. Tale obiettivo potrebbe rispondere ad un progetto di riassetto della rete in regioni interessate con una certa frequenza da eventi meteorologici particolarmente intensi i quali in passato hanno creato gravi ripercussioni sui collegamenti stradali.

Altro obiettivo da perseguire nello sviluppo della metodologia di ricerca è quello di offrire una misura di vulnerabilità che possa in qualche modo tener conto anche dell'esposizione di una data regione. In questo senso occorre indagare anche sulle conseguenze derivanti dalla chiusura di un arco stradale o da un collegamento in seguito ed eventi naturali. Tali conseguenze dovrebbero non soltanto tener conto delle ripercussioni sulle operazioni di emergenza (arrivo dei soccorsi, evacuazione, etc.), ma dovrebbero anche indagare sugli impatti a medio e lungo termine dati dalla chiusura di

un collegamento che, per esempio, risulta di notevole importanza per la prosecuzione di tutte le attività (economiche sociali, etc) di vitale importanza per una comunità.

# **1. VIABILITÀ E PROTEZIONE CIVILE: INDIVIDUAZIONE DEL RISCHIO SULLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO**

## ***1.1. LA PROTEZIONE CIVILE IN ITALIA.***

Per poter introdurre l'argomento oggetto della tesi appare doveroso fare alcuni cenni relativi all'organizzazione del sistema di Protezione Civile in Italia e agli strumenti di pianificazione e programmazione di cui la stessa si dota per poter rispondere al meglio ad eventi inattesi.

La Legge n. 225 del 24 febbraio 1992 ha istituito in Italia il Servizio Nazionale della Protezione Civile. L'art. 16 attribuisce alle Regioni le funzioni concernenti tra l'altro la viabilità, gli acquedotti, ed i lavori pubblici di interesse regionale. La sopracitata legge organizza il servizio di protezione civile come un "Servizio Nazionale", che viene coordinato dal Presidente del Consiglio dei Ministri ed è composto dall'insieme delle Amministrazioni dello Stato, dalle Regioni, dalle Province, dai Comuni, dagli Enti pubblici nazionali e territoriali e da ogni altra Istituzione ed Organizzazione pubblica e privata presente sul territorio nazionale. Il Dipartimento della Protezione Civile provvede al coordinamento del Servizio nazionale ed alla promozione delle attività di protezione civile. La Protezione Civile non rappresenta perciò un organismo unitario che tiene sotto diretto controllo e gestione le diverse tipologie di rischio che interessano il nostro territorio. In realtà essa investe un campo di attività fortemente interdisciplinare al cui interno emergono precipuamente due aspetti: l'organizzazione (intesa come conoscenza e capacità organizzativa) e l'operatività.

In molti Paesi europei la protezione civile risulta un compito assegnato a una sola o a poche Istituzioni e strutture pubbliche; in Italia, invece, è coinvolta in questa funzione tutta l'organizzazione dello Stato, dai Ministeri al più piccolo Comune, ed anche la società civile partecipa, attraverso le Associazioni di volontariato, al Servizio Nazionale della Protezione Civile. Le ragioni di questa scelta si possono individuare nell'incontro tra una motivazione istituzionale ed un' esigenza operativa legata alle caratteristiche del nostro territorio, la cui particolarità risiede anche nella grande varietà di eventi calamitosi a cui può essere soggetto (frane, alluvioni, terremoti, eruzioni vulcaniche, etc.).

Il concetto di protezione civile comprende, pertanto, il complesso di Organismi, strutture, mezzi ed iniziative tendenti alla previsione e prevenzione degli eventi calamitosi, al soccorso, in caso di calamità, e all'avvio della ripresa delle normali condizioni di vita.

La previsione consiste nelle attività volte all'individuazione delle cause dei fenomeni calamitosi, alla definizione dei rischi ed all' identificazione delle aree critiche del territorio.

La prevenzione consiste nell'adozione di provvedimenti diretti a rimuovere le cause degli eventi calamitosi o perlomeno a ridurne gli effetti.

Il soccorso consiste nel porre in atto gli interventi diretti ad assicurare alle popolazioni colpite ogni forma di assistenza. Tra le attività di soccorso una delle fasi più importanti riguarda non solo il soccorso vero e proprio ma l'eventuale evacuazione delle zone abitate, nonché il ripristino, anche parziale, della viabilità e dei servizi essenziali.

L'avvio della ripresa consiste nell'attuazione delle iniziative necessarie per favorire l'opera di ricostruzione delle strutture urbane e del tessuto socioeconomico, nonché nel ripristino delle normali condizioni ambientali e di vita.

## ***1.2. PROGRAMMAZIONE E PIANIFICAZIONE DI PROTEZIONE CIVILE.***

E' possibile distinguere tra **programmazione** e **pianificazione** di protezione civile.

In particolare per programmazione si intende "la fase di previsione dell'evento, intesa come conoscenza dei rischi che insistono sul territorio, nonché la fase della prevenzione intesa come attività destinata alla mitigazione dei rischi stessi". La programmazione avviene attraverso un meccanismo che potremmo definire "a cascata": esistono i programmi nazionali, quelli regionali e quelli provinciali.

Per pianificazione si intende invece "l'insieme delle procedure operative di intervento da attuarsi nel caso in cui si verifichi l'evento atteso contemplato in un apposito scenario". Tra i piani di emergenza si può distinguere tra

- **Piani di Emergenza Nazionali**, riferiti ad aree specifiche del territorio italiano individuate con il concorso della comunità scientifica e comunque oggetto di programmazione nazionale;

- **Piani Provinciali**, predisposti dal Prefetto per fronteggiare l'emergenza su tutto il territorio provinciale curandone altresì l'attuazione sulla base degli scenari di rischio predisposti dalla Provincia;
- **Piani Comunali** i quali gestiscono l'emergenza a livello comunale.

La programmazione è pertanto qualcosa di distinto dalla pianificazione. Se i piani consistono nell'insieme delle procedure operative d'intervento da attuarsi nel caso si verifichi l'evento atteso contemplato in un apposito scenario, i programmi rappresentano invece il presupposto necessario per la stessa pianificazione di emergenza.

I programmi di previsione e prevenzione dovrebbero essere redatti con la finalità di far risaltare l'inadeguatezza di strutture presenti sul territorio o a difesa del territorio, con la conseguente necessità di provvedere, con interventi strutturali, al loro adeguamento per la funzionalità richiesta. La redazione di un programma di previsione e prevenzione comporta indagini mirate sulla consistenza e le caratteristiche delle aree e dei beni a rischio, e costituisce parte essenziale per l'attivazione e la gestione di reti di monitoraggio. Il compito principale dei piani di prevenzione a livello provinciale, quindi, consiste nell'individuazione dei punti di fragilità del sistema o delle carenze esistenti sul territorio. All'interno di alcuni programmi di prevenzione provinciali sono puntualmente individuati gli elementi vulnerabili di un territorio, comprese le infrastrutture viarie. La valutazione sistematica della propensione a subire danni, nei diversi casi di rischio, delle principali strade della provincia risulterebbe di notevole aiuto laddove si avviasse un progetto di realizzazione o di riqualificazione del patrimonio stradale, con la finalità della messa in sicurezza dello stesso.

Con riferimento agli aspetti riguardanti la mobilità e la viabilità, e a come essi vengono trattati all'interno di tali strumenti di pianificazione di emergenza, si nota come, all'interno dei piani di emergenza, la viabilità viene considerata solo nell'organizzazione delle fasi di crisi; niente viene detto sulle reali condizioni delle strade, sulle loro reali capacità di poter svolgere la funzione di supporto alle operazioni della protezione civile ad esse affidate: probabilmente si rimanda agli Enti gestori delle singole strade la manutenzione o la riqualificazione delle stesse ai fini delle emergenze.

La redazione dei piani di emergenza, come pure dei programmi, potrebbe rappresentare un valido supporto alle attività di gestione/manutenzione del patrimonio



stradale; il confronto diretto tra rappresentanti ed esperti della protezione civile e tecnici operanti nel settore delle strade rappresenterebbe un terreno fertile per le attività di entrambi. In questa direzione si suggerisce che, all'interno del momento di pianificazione strategica di gestione del patrimonio stradale, si tenga dovutamente conto della presenza di eventuali rischi territoriali e degli strumenti di gestione e pianificazione a questi relativi.

Non sempre nella redazione dei piani di emergenza viene attribuita la giusta importanza alla funzione svolta dal sistema viario. Tuttavia, analizzando le Linee Guida per la Redazione di Piani Comunali per il Rischio Idrogeologico [19], si osserva l'intento di porre in giusto risalto la viabilità, prevedendo, tra i contenuti del Piano, la descrizione delle infrastrutture di trasporto. In particolare, all'interno del piano si evidenziano le seguenti azioni :

- distinzione cartografica tra direttrici principali e vie intercomunali;
- indicazione delle funzioni assolte dalle diverse strade;
- distinzione tra viabilità principale e viabilità minore;
- valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture viarie;
- valutazione del danno potenziale connesso alla perdita di funzionalità;
- valutazione della vulnerabilità di porti, stazioni ferroviarie, etc;
- valutazione dei danni funzionali indiretti;
- valutazione di nodi critici e strutture strategiche del territorio;
- pianificazione e predisposizione della viabilità di soccorso;
- indicazione di alternative di percorrenza in funzione della tipologia e dell'importanza dell'evento.

Le azioni sopraelencate rappresentano in sostanza i passi necessari per la predisposizione di una viabilità più sicura ai fini della protezione civile. L'accento posto da questo strumento di pianificazione sulla funzione svolta dalle diverse strade mette in evidenza come ai fini della gestione delle emergenze non tutte le vie di comunicazione risultano uguali tra di loro: alcune hanno un'importanza maggiore per la loro capacità di convogliare maggiori flussi di traffico, o per la loro maggiore o minore vulnerabilità all'evento. Ribaltando il ragionamento si potrebbe dire che, nell'individuazione delle

priorità di intervento in una rete viaria esistente, non tutte le strade risultano essere uguali, ma nell'ambito delle problematiche di protezione civile, possono e devono essere distinte in base alle loro reali capacità di svolgere ed assicurare gli interventi di soccorso in piena sicurezza.

Durante la fase di soccorso, infine, il piano indica come dovrebbero essere acquisiti sufficienti dati sullo stato del sistema dei trasporti, al fine di supportare le successive attività. Tali dati riguardano, ad esempio, la causa dell'interruzione, la gravità dell'interruzione, etc.; dati che potrebbero essere utilizzati nella fase di programmazione degli interventi di manutenzione della rete stradale, degli eventuali interventi strutturali sulla rete, o sulle singole opere d'arte, per tenere debitamente conto dei danni effettivamente subiti dalla rete, o che potrebbero eventualmente essere riportati e catalogati all'interno di opportuni sistemi informativi utilizzabili ai fini della gestione delle attività di Protezione Civile.

Le linee guida riportano al loro interno uno schema di acquisizione dei dati da compilare ad evento avvenuto da parte delle Amministrazioni competenti [19]. L'utilizzo di una scheda di questo tipo risulta importante per diverse ragioni:

- una prima quantificazione del danno risulta d'aiuto per le successive operazioni di ricostruzione che verranno distinte in base alla loro priorità di intervento;
- la quantificazione del danno subito dall'infrastruttura servirà in un secondo momento alla valutazione della vulnerabilità della stessa;
- la possibilità di poter rilevate tali informazioni per diversi eventi favorisce la ricostruzione di serie storiche di eventi e conseguentemente aiuta nella determinazione dell'eventuale pericolosità cui è sottoposta l'infrastruttura stradale;
- i dati rilevati attraverso le schede dovrebbero essere successivamente raccolti in una banca dati consultabile ed aggiornabile che possa fornire un valido aiuto sia alle Amministrazioni Locali (nel momento in cui ad esempio si predispone un piano di emergenza), sia eventualmente per ulteriori attività di ricerca.

SCHEDA PER LA RILEVAZIONE DEI DATI IN SEGUITO ALL' EVENTO	
<b><u>A) RETE STRADALE</u></b>	
Interruzione (Ubicazione) _____	
Causa dell'interruzione	
crollo della sede viaria	<input type="checkbox"/>
ostruzione sede viaria	<input type="checkbox"/>
crollo opera di attraversamento	<input type="checkbox"/>
compromissione oera di attraversamento	<input type="checkbox"/>
altra _____	
Gravità dell'interruzione	
lieve (non è necessario l'impiego dei mezzi pesanti)	<input type="checkbox"/>
grave (si richiede l'impiego di mezzi pesanti)	<input type="checkbox"/>
permanente (necessita di percorsi alternativi e/o interventi speciali)	<input type="checkbox"/>
Estensione dell'interruzione	
localizzata	<input type="checkbox"/>
estesa	<input type="checkbox"/>
descrizione _____	
<b><u>B) RETE FERROVIARIA</u></b>	
Causa dell'interruzione	
crollo massicciata ferroviaria	<input type="checkbox"/>
ostruzione sede ferroviaria	<input type="checkbox"/>
altra _____	
Gravità dell'interruzione	
lieve (non è necessario l'impiego dei mezzi pesanti)	<input type="checkbox"/>
grave (si richiede l'impiego di mezzi pesanti)	<input type="checkbox"/>
permanente (necessita di interventi speciali)	<input type="checkbox"/>
Estensione dell'interruzione	
localizzata	<input type="checkbox"/>
estesa	<input type="checkbox"/>
descrizione _____	
<b><u>C) RETE AUTOSTRADALE</u></b>	
Verifica transitabilità dell'ex casello	
<b><u>RILEVO FOTOGRAFICO</u></b>	<div style="border: 1px solid black; width: 400px; height: 100px; margin: 0 auto;"></div>

**Figura 1. Schema di scheda per la rilevazione dei dati sulla rete al seguito del verificarsi dell'evento (elaborazione da Cipolla, 1998)**

Alla luce di quanto sopra esposto è quindi evidente che, sebbene il piano di emergenza nasca per gestire situazioni di elevata criticità, in realtà, per le analisi di rischio che sviluppa al suo interno e per le metodologie che adotta, esso assume significati e valenze certo ben più ampie. Infatti, attraverso l'analisi sistematica del rischio, è possibile affrontare il problema del riuso dell'edificato fornendo, nel contempo, idee e indirizzi alla programmazione futura dell'edificabile, permettendo agli esperti del settore lo studio di scenari e di alternative di tracciato il più possibile compatibili con gli scenari di rischio.

Da questa breve analisi delle strutture e degli strumenti utilizzati all'interno degli interventi di protezione civile si possono trarre alcune conclusioni:

- le **infrastrutture di trasporto** svolgono un ruolo determinante nella gestione delle emergenze: rappresentano infatti le reti per mezzo delle quali vengono svolte le attività di evacuazione e di soccorso in una data area a rischio. L'interruzione anche temporanea delle infrastrutture di trasporto può determinare gravi conseguenze, sia nel breve che nel medio e lungo periodo;
- la **programmazione e la pianificazione** della Protezione Civile rappresentano un utile strumento, laddove presente, per poter, non solo gestire le emergenze, ma anche arrivare ad una prima perimetrazione delle **aree a rischio** riguardante le infrastrutture di trasporto;
- nella descrizione delle infrastrutture di trasporto si rileva l'importanza e la necessità di poter distinguere la **funzione** attribuibile alle diverse strade; all'interno della rete si possono infatti distinguere gli archi che rappresentano le direttrici principali, le vie di comunicazione intercomunale, nonché la viabilità minore a servizio di un territorio;
- notevole importanza ha, inoltre, la possibilità di poter distinguere le infrastrutture di trasporto in base alla loro maggiore o minore capacità di convogliare i flussi di traffico, e quindi in base alla loro **vulnerabilità** o sicurezza;
- i Piani dovrebbero essere continuamente aggiornati per poterne garantire non solo l'affidabilità, ma anche la rispondenza a situazioni che nel corso del tempo potrebbero variare. Analogamente dovrebbe essere valutato lo stato di **manutenzione** delle strade interessate dal Piano per verificarne l'effettiva rispondenza alle funzioni affidate;

- deve essere considerata, con attenzione, la progettazione di **“itinerari di supporto”**, che attraversino aree meno esposte a criticità meteorologiche e sui quali indirizzare una parte dei flussi di traffico, così da alleviare le condizioni di circolazione sul corridoio principale.

### ***1.3. LA GESTIONE DELLE EMERGENZE.***

Sempre più frequentemente, all'interno delle operazioni di gestione delle emergenze, si sente parlare dei concetti di “Disaster Management” e “Emergency Management”.

All'interno dell'attività di “disaster management” risulta di fondamentale importanza poter configurare “scenari” che prefigurano ciò che potrebbe accadere all'insorgere di un disastro. Per valutare gli effetti che un evento particolarmente rischioso può determinare su beni, manufatti, comunità si fa ricorso a discipline di tipo deterministico, come l'idrogeologia, la sismologia, la geologia. Risulta invece più difficoltoso poter predire se, in seguito a determinati eventi calamitosi, la stessa macchina di gestione delle emergenze potrebbe andare incontro a una crisi organizzativa. Parlando di un sistema dei trasporti che deve servire da supporto per le attività di protezione civile, nell'organizzazione di un sistema a rete sicuro, è di fondamentale importanza:

- potersi interfacciare con esperti del settore e con le diverse discipline attinenti, per poter quantificare e predisporre i diversi scenari di rischio. Un'analisi del rischio e dei diversi scenari di pericolosità dello stesso risulta importante per poter configurare un sistema dei trasporti il più sicuro possibile;
- organizzare un sistema dei trasporti ed identificare itinerari più o meno sicuri o vulnerabili all'evento, in quanto fasi assolutamente necessarie ma che devono essere strettamente integrate, nella gestione delle emergenze, all'interno della macchina organizzativa. È chiaro infatti come il sistema privo di una corretta organizzazione, di fronte al verificarsi di un evento, atteso o inatteso, potrebbe andare incontro a un possibile collasso.

All'interno della gestione delle emergenze possiamo identificare i seguenti principi:

1. **organizzazione**: mettere in atto una macchina organizzativa nella quale i ruoli e le responsabilità siano definite in maniera chiara prima che si verifichi l'evento;
2. **comando e controllo**: ciascuna operazione deve avere i propri responsabili ai quali poter fare riferimento; ad ogni ruolo compete una data responsabilità;
3. **coordinamento**: tutti i ruoli e tutte le operazioni necessarie devono essere coordinate tra di loro e definite nei piani di emergenza per una riuscita ottimale dello stesso;
4. **gestione delle informazioni**: risulta di fondamentale importanza poter avere a disposizione informazioni aggiornate e gestite opportunamente;
5. **attivazione**: l'attivazione della macchina delle emergenze o dei soccorsi deve poter far riferimento a una determinata Autorità e deve, in qualche modo, essere indipendente dalla proclamazione dello stato di allerta o di emergenza.

In linea generale possiamo dire che tutte le misure che vengono messe in atto per la gestione delle emergenze possono essere raggruppate in tre momenti principali:

- **attività ordinarie;**
- **attività preevento;**
- **attività post evento.**

Rientrano nelle attività ordinarie (per quanto attiene al sistema dei trasporti) la pianificazione, la progettazione e la costruzione delle infrastrutture stradali, nonché il controllo delle stesse.

Per attività di pre-evento intendiamo la valutazione di rischi potenziali attesi, la messa in atto di tutte le misure di rafforzamento e messa in sicurezza necessarie, nonché l'allerta e la preparazione all'evento disastroso. Tra le attività post evento e le attività pre-evento avviene il verificarsi dell'evento stesso, sicché nell'ultima fase sono comprese tutte le misure che devono attuarsi ad evento ancora in corso e i Piani o le azioni necessarie per la riparazione temporanea o permanente dei beni che sono andati distrutti o danneggiati.

Questi tre momenti rappresentano in maniera generale le quattro fasi di gestione delle emergenze stesse che sono:

1. **fase della mitigazione;**

2. fase della preparazione;

3. fase della risposta;

4. fase della ripresa.

GESTIONE DELLE EMERGENZE		
PRINCIPI	MOMENTI	FASI
1. Organizzazione	1. Attività ordinarie	1. Mitigazione
2. Comando e controllo	2. Attività preevento	2. Preparazione
3. Coordinamento	3. Attività post evento	3. Risposta
4. Gestione delle informazioni		4. Ripresa
5. Attivazione		

Figura 2 Principi, momenti e fasi della gestione delle emergenze.

Per quanto attiene lo studio delle infrastrutture stradali si può affermare che, nella fase di **mitigazione** risulta di fondamentale importanza ridurre la probabilità di un evento. Tale riduzione può essere effettuata solo se, già in fase di pianificazione e disegno di una infrastruttura, si valutano attentamente tutti quei fattori che possono influenzare la sicurezza della stessa. Per le strade esistenti dovrà essere invece valutato il livello di vulnerabilità, nonché gli interventi da attuare per la riduzione della stessa in ordine di priorità. Quando si pianifica la costruzione di una nuova strada si deve tener conto che essa interagisce profondamente con il territorio nel quale viene inserita. Per questa ragione occorre porsi come obiettivo principale la selezione che deve esser fatta, ogni volta che risulta possibile, di tutti i siti dove il rischio potenziale risulta comparativamente basso; il nuovo tracciato dovrebbe tener conto delle condizioni meteorologiche, geografiche, geologiche e idrogeologiche dell'area nella quale viene realizzato. Per l'identificazione di tali siti potrebbero, in particolare, essere utilizzati due strumenti: l'elaborazione delle mappe del rischio e lo studio di impatto ambientale. La presenza di mappe del rischio che differenziano un dato territorio in base a differenti livelli di pericolosità potrebbe risultare un utile strumento in fase di progettazione preliminare, poiché consentirebbe una prima identificazione di versanti ad alto rischio, che dovrebbero essere evitati, o di versanti in cui il rischio risulta minore o comunque accettabile. Lo studio di impatto ambientale, laddove presente, dovrebbe comprendere tutte le analisi e gli studi che contengono dati sulle caratteristiche del suolo, o comunque del territorio attraversato. Tali dati dovrebbero essere attentamente valutati ed integrati all'interno della progettazione. Il disegno dell'infrastruttura stessa e delle sue opere d'arte andrebbe studiato in perfetto accordo con questo genere di dati e di valutazioni.

Per questa ragione fare esclusivo riferimento agli standard prescritti dalle differenti normative non è sufficiente; la progettazione andrebbe particolareggiata in base alle informazioni emerse dallo studio delle carte del rischio o dallo studio del territorio specifico. La stessa fase della costruzione delle infrastrutture risulta importante a tal proposito. È chiaro infatti che è di fondamentale importanza che venga seguito dettagliatamente quanto indicato dal progetto. Rientrano sempre nella fase di mitigazione le operazioni di ispezione, di valutazione dei danni, nonché di consolidamento ed ammodernamento delle strutture, in ultima analisi, di manutenzione: la possibilità di poter effettuare ispezioni regolari, che valutino lo stato di “salute” di una data infrastruttura aiuta a identificare per tempo anomalie e condizioni inusuali che potrebbero rappresentare campanelli di allarme.

Nella fase di **preparazione** dovrebbero essere migliorate le capacità operazionali di rispondere ad una data emergenza, sia per eventi prevedibili, che non. La fase di preparazione implica provvedimenti di diversa natura. Essa include, per esempio, la realizzazione e l’implementazione di particolari leggi e regolamenti, di monitoraggi costanti e di ispezioni di controllo prima che l’evento si verifichi. In fase di preparazione risulta di fondamentale importanza poter valutare la vulnerabilità di un dato sistema stradale. La valutazione preventiva della vulnerabilità permette infatti di classificare le strade in base alla loro affidabilità, e conseguentemente stabilire percorsi alternativi e deviazioni. Prevenire significa ancora realizzare un sistema di controllo efficace, migliorare la cooperazione tra i diversi Enti e le diverse Aziende, stabilire protocolli per la gestione del traffico (per esempio, designare preventivamente le sezioni dove apporre restrizioni o limitazioni), informare la popolazione della presenza di un Piano di emergenza e testarlo mediante esercitazioni.

La fase di **risposta** ad un determinato evento inizia subito dopo il verificarsi dello stesso. Le preoccupazioni più comuni riguardano l’evacuazione della popolazione, l’arrivo dei soccorsi, il provvedere alle cure mediche necessarie, il contenimento dell’entità dei danni, nonché la protezione dell’ambiente. Nella fase di risposta, per quanto riguarda le strade, è di fondamentale importanza poter disporre, sin dai primi momenti, di dati sullo stato del sistema viario. Dovrebbero cioè, essere valutati i primi danni sulla rete, mediante azioni di sorveglianza e di controllo. Tale valutazione dovrebbe esser fatta da squadre opportunamente istruite, mediante moduli o schede già predisposti. È indispensabile poter conoscere se è possibile utilizzare la strada, quali



sono i danni e quanto sono estesi, e tutta una serie di altre informazioni necessarie, non solo per poter meglio gestire le operazioni di emergenza, ma anche per compiere una valutazione iniziale dei danni e stabilire un ordine di priorità per gli interventi di ripristino.

La fase di **ripresa** riguarda la realizzazione di progetti a lungo o a breve termine. I progetti a breve termine riguardano tutte le riparazioni di emergenza necessarie per poter riaprire nel minor tempo possibile la strada al traffico (eventualmente con alcune limitazioni di transito). Gli interventi da attuare nella fase di ripresa devono essere definiti all'interno di un Piano delle riparazioni: esso dovrebbe stabilire le riparazioni necessarie attraverso un ordine di priorità. Stabilire questo ordine di priorità risulta assolutamente necessario per poter arrivare ad una corretta ed efficace allocazione delle risorse nel territorio. L'analisi di diversi fattori potrebbe concorrere per stabilire il livello di priorità; il grado di danno, le caratteristiche dell'area colpita, la tipologia degli elementi da considerare.

Nella tabella 1 vengono riassunte schematicamente le diverse fasi di gestione dell'emergenza relativamente ad un sistema dei trasporti, le azioni mediante le quali esse si realizzano, e alcuni degli strumenti che possono essere utilizzati per la loro attuazione.

**Tabella 1 Fasi, azioni e strumenti di un sistema di gestione delle infrastrutture in condizioni di emergenza.**

FASI	AZIONI	STRUMENTI
MITIGAZIONE	Pianificazione nuova infrastruttura	Carte di rischio
		Valutazione di impatto ambientale
		Attenzione ai particolari di disegno e opere d'arte
	Controllo infrastrutture esistenti	Valutazione vulnerabilità
		Piano degli interventi
		Piano degli interventi di ispezione
	Ispezione	Manuale dei metodi di ispezione
		Installazione strumenti di allerta
		Sistema di ricezione osservazioni automobilisti
	Valutazione danni	Check list
PREPARAZIONE	Consolidamento e manutenzione	Lavori preventivi
		Lavori protettivi
		Piano degli interventi
	Gestione della strada	Protocolli gestione emergenze
		Attribuzione di ruoli
		Implementazione leggi e regolamenti
		Ispezioni
		Azioni di monitoraggio
	Valutazione della vulnerabilità	Indici di vulnerabilità di strade
		Carte della vulnerabilità della rete
		Carte di percorsi alternativi
		Implementazioni programmi per valutazione in tempo reale dei percorsi
	Gestione del traffico	Restrizioni di traffico
		Strumenti per l'informazione dell'automobilista
		Strumenti informazione sul tempo
		Strumenti di rilevazione movimenti franosi
RISPOSTA	Procedure di risposta immediata	Chiamate di emergenza
		Avvio piano di emergenza
		Controllo struttura stradali
		Controllo danni
		Prime liste delle riparazioni urgenti
		Restrizioni di Traffico
	Sorveglianza	Informazione pubblica
		Manuali di investigazione
		Check list, grafici di controllo
		Strumenti di controllo
		Strumenti di registrazione
		Strumenti di comunicazione dati
RIPRESA	Operazioni di emergenza	
	Controllo del traffico	
	Riparazioni di emergenza	
	Riparazioni definitive e permanenti	Piano delle riparazioni
		Piano delle priorità delle riparazioni

#### **1.4. IL SISTEMA DEI TRASPORTI COME LIFELINES.**

Per “lifelines” si intendono dei sistemi a rete che mettono in relazione e collegano vari ambiti spaziali garantendo una moltitudine di servizi essenziali e indispensabili per la sopravvivenza della popolazione (viabilità, ma anche rete del gas, dell’elettricità, dell’acqua, etc.) [13]. Garantire il buon funzionamento di questi sistemi a rete, il mantenimento della loro funzionalità in condizioni di emergenza, risulta di vitale importanza per poter mitigare i danni causati da una calamità naturale.

Vista la diffusione sul territorio di tali sistemi, essi risultano particolarmente vulnerabili rispetto ai vari disastri di origine naturale, quali terremoti, catastrofi idrogeologiche, inondazioni, incendi, etc. Risulta quindi di fondamentale importanza poter conoscere preventivamente il livello di vulnerabilità delle lifelines rispetto ai diversi eventi, nonché la loro particolare esposizione rispetto a differenti categorie di rischio. Ciò significa, in altre parole, poter valutare il grado di affidabilità di una rete. Questa conoscenza risulta assolutamente indispensabile laddove si predisponga un piano di emergenza per una data regione. Infatti, alcune lifelines devono risultare in grado di svolgere la loro funzione immediatamente dopo l’evento catastrofico, devono permettere l’arrivo dei soccorsi, o l’eventuale evacuazione della popolazione colpita, devono consentire le diverse comunicazioni, nonché approvvigionare le aree colpite dei beni di prima necessità.

Esistono diverse categorie di lifelines, ad esempio gli acquedotti e le fognature, la rete dell’energia elettrica, del gas, delle telecomunicazioni e chiaramente i trasporti. Si tratta in tutti questi casi di veri e propri sistemi a rete che garantiscono non solo le relazioni tra vari ambiti spaziali, anche molto distanti tra loro, ma che permettono la distribuzione e l’approvvigionamento di beni e risorse da cui dipende la sopravvivenza delle popolazioni.

Il sistema dei trasporti, come già detto, rientra a pieno titolo nella categoria delle lifelines, è inoltre opinione condivisa [50] che le infrastrutture stradali possano considerarsi tra le più importanti lifelines di un territorio. Basti pensare che le eventuali operazioni di manutenzione e riparazione di altre lifelines (condotte del gas, dell’elettricità, etc) passano attraverso l’utilizzo delle infrastrutture stradali. Inoltre le infrastrutture di trasporto si caratterizzano per una peculiarità che le distingue da tutte le altre: infatti, attraverso le reti di trasporto, oltre che i beni si muovono le persone, ciò

implica che, qualora l'infrastruttura sia esposta ad un rischio elevato, contemporaneamente saranno esposte a tale rischio tutte le persone che utilizzano quella infrastruttura. Garantire l'affidabilità di questi sistemi significa quindi anche assicurare l'incolumità delle persone che ne fanno uso.

Alla luce di quanto esposto, risulta molto importante poter individuare la rete stradale che per le sue caratteristiche può svolgere funzioni di "lifeline". A una prima individuazione su carta dovrebbero seguire studi sufficientemente dettagliati che permettano di comprendere la reale affidabilità delle infrastrutture in questione, o eventualmente consentano di individuare percorsi alternativi.

Riassumendo, per infrastrutture di trasporto con caratteristiche di lifelines si intendono strutture viarie sufficientemente sicure, capaci di:

- garantire l'accessibilità alle aree colpite;
- garantire l'arrivo dei soccorsi provenienti dall'esterno;
- garantire l'accesso alle strutture di protezione civile, strutture sanitarie, stazioni ferroviarie, aeroporti, centrali e linee elettriche e a tutti gli altri elementi strategici del sistema;
- garantire la prosecuzione, ad emergenza conclusa, delle attività produttive di una data regione.

### ***1.5. I RISCHI SULLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO.***

Lo studio sistematico dei rischi, ai quali possono essere esposte le infrastrutture viarie, è uno strumento indispensabile se si vuole garantire il livello di servizio di una data rete.

I rischi possono essere suddivisi seguendo differenti classificazioni. Considerando le cause che possono portare ad eventi rischiosi, possono essere diversificati in:

- **eventi naturali**, (come ad esempio terremoti, alluvioni) direttamente legati a fattori non controllabili a priori;
- **eventi antropici**, ovvero causati dall'attività umana;

oppure ancora si può considerare lo stesso sistema dei trasporti come una delle possibili cause del rischio. Ad esempio, l'ammaloramento delle strutture e delle

sovrasttrutture può portare, in situazioni estreme, al collasso delle vie. Il trasporto di materiali pericolosi (Hazmat) può essere considerato come un esempio controverso: esso infatti comporta l'esposizione a rischio non solo dell'infrastruttura stessa, ma anche delle aree vicine, della popolazione, dell'ambiente.

Se invece si classificano gli eventi in base alla loro probabilità di accadimento si può parlare di **eventi ordinari**, come l'allagamento delle sede stradale o ferroviaria, o **eventi eccezionali**, ad esempio le alluvioni, i terremoti, le frane. Gli eventi possono essere, ancora, **prevedibili o imprevedibili**. Ad esempio, lo sviluppo di tecnologie avanzate nel campo della meteorologia ci consente di prevedere, a volte con largo anticipo, manifestazioni meteorologiche particolarmente intense, e quindi di porre in atto tutte le misure cautelative necessarie per la salvaguardia della popolazione e dei beni. I fenomeni legati a movimenti della crosta terrestre, come ad esempio i terremoti o le eruzioni vulcaniche sono ancora difficilmente prevedibili; conseguentemente risulta difficile riuscire a mettere in moto con sufficiente anticipo tutte le misure di soccorso necessarie. Se infatti si parla degli interventi che possono essere realizzati per incrementare il livello di sicurezza di una data regione, questi possono essere suddivisi in azioni finalizzate a ridurre la probabilità di accadimento di un evento, e si parla in questo caso di **sicurezza attiva** (sono azioni di questo tipo, ad esempio, interventi di stabilizzazione dei versanti per la riduzione del rischio frane), ovvero, una volta individuata la causa del rischio, si interviene su questa per mitigarne o scongiurarne del tutto le conseguenze. Sono invece azioni di **sicurezza passiva** tutti quelli interventi che agiscono per ridurre la gravità di un evento o le sue conseguenze. Questo genere di interventi risulta chiaramente l'unico applicabile in caso di emergenze non prevedibili. Sono azioni di sicurezza passiva la realizzazione di sistemi di previsione e di allerta, nonché l'elaborazione di modelli di gestione delle reti.

Le infrastrutture di trasporto, in questo contesto, sono quindi elementi esposti al rischio o causa esse stesse di rischi. Rappresentano quindi elementi vulnerabili che possono essere coinvolti direttamente o indirettamente, ma allo stesso tempo elementi imprescindibili per la gestione delle emergenze.

### ***1.6. EQUAZIONE DEL RISCHIO.***

Come già detto in precedenza esistono diversi rischi che possono danneggiare il sistema dei trasporti. Si va da rischi ordinari, ovvero che possono incorrere

quotidianamente, a rischi straordinari che accadono eccezionalmente. Alcuni rischi possono accadere contemporaneamente, altri ne causano conseguentemente di secondi. Inoltre le conseguenze degli eventi variano notevolmente da caso a caso, si assiste perciò ad eventi (in genere di bassa intensità) le cui conseguenze non sono gravi, ad eventi che creano danni ingenti o addirittura causano perdita di vite umane.

Se le definizioni di rischio espresse dalla letteratura possono quindi variare tra di loro, in linea di massima queste riguardano la combinazione e l'unione di due elementi: la probabilità e le conseguenze. Per cui il rischio è il prodotto tra la probabilità che un evento si verifichi e le conseguenze causate da tale evento [7].

Un modo per poter spiegare tale concetto è l'analisi della cosiddetta **“curva di rischio”** (figura 3) in questa ad eventi con probabilità di accadimento elevate corrispondono conseguenze trascurabili e viceversa. Sono eventi con alta probabilità, ad esempio, le congestioni stradali, che in genere non determinano gravi conseguenze; eventi a minore probabilità sono lo sversamento di sostanze pericolose, i terremoti, le alluvioni, ecc., che, come noto, generano conseguenze ben più gravi.

Quando si parla di affidabilità di una rete di trasporto intendiamo la capacità, che essa dovrebbe mantenere per un dato periodo di tempo, di continuare ad offrire le prestazioni al livello di servizio che le erano state attribuite in fase di progettazione.

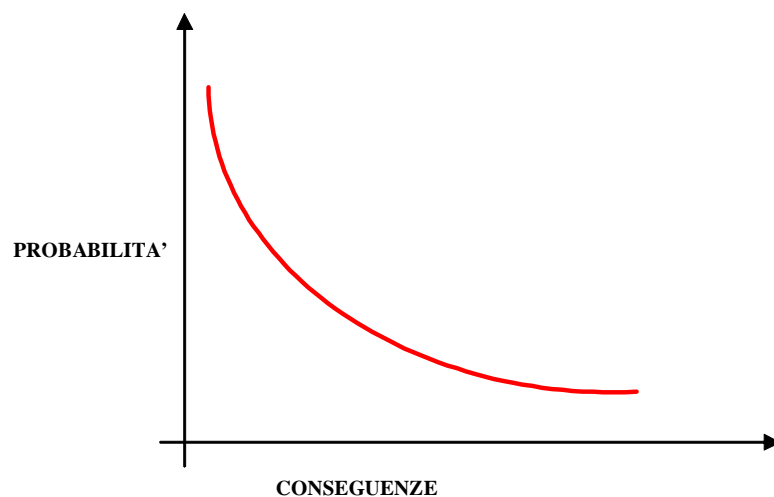


Figura 3. Curva di rischio.

Chiaramente maggiore è il rischio al quale l'infrastruttura di trasporto viene esposta minore sarà il livello di affidabilità che essa è capace di garantire. Risulta quindi

di fondamentale importanza poter non solo definire il concetto di rischio, ma anche quantificarlo in qualche modo.

Qualunque sia la definizione di rischio utilizzata esso è considerato in generale come il prodotto di tre fattori distinti (**rischio totale**): la **pericolosità**, o probabilità di accadimento dell'evento, il valore (**esposizione**) degli elementi a rischio, e la **vulnerabilità** degli elementi a rischio.

Il **rischio R** può essere quindi definito in generale come “l'entità del danno atteso in una data area in un certo intervallo di tempo in seguito al verificarsi di un particolare evento calamitoso”.

In maniera analoga l'United Nations Disaster Relief Co-ordination Office definisce:

- la **pericolosità (H)** come la probabilità che l'evento accada in un certo intervallo di tempo e in una zona tale che potrebbe influenzare l'elemento a rischio;
- la **vulnerabilità (V)** come il grado di perdita, che può essere espresso in una scala da zero, che significa nessun danno, a uno, che significa perdita totale. Tale perdita si può produrre su un certo elemento o su un gruppo di elementi esposti a rischio al seguito del verificarsi di un evento calamitoso;
- l'**esposizione (E)**, o anche il valore dell'elemento a rischio, rappresenta il valore degli elementi a rischio in una determinata area, come, ad esempio, la popolazione, le proprietà, i servizi pubblici, le attività economiche a rischio. Tale valore può essere espresso in termini monetari o in numero e quantità delle entità esposte.

Seguendo la definizione suddetta e sotto determinate ipotesi il rischio totale può essere espresso mediante la seguente equazione:

$$\text{Rischio} = \text{Pericolosità} \times \text{Vulnerabilità} \times \text{Esposizione}$$

$$R = H \times V \times E$$

Eq. 1

Quando risulta difficile valutare quantitativamente il rischio si può ricorrere a sintesi parziali delle informazioni, valutando, anziché il rischio totale, il “**rischio specifico**” **R<sub>s</sub>** che significa il grado atteso di perdita dovuta a un particolare fenomeno naturale. Il rischio specifico può essere espresso dalla seguente relazione:

$$\text{Rischio specifico} = \text{Pericolosità} \times \text{Vulnerabilità}$$

$$R_S = H \times V$$

Eq. 2

Ancora si può valutare il “**Danno potenziale**” **D**, che esprime l’entità potenziale delle perdite nel caso si verifichi l’evento temuto. Sotto determinate ipotesi il danno può essere espresso da:

$$\text{Danno} = \text{Vulnerabilità} \times \text{Esposizione}$$

$$D = V \times E$$

Eq. 3

Seguendo le definizioni suddette il rischio insistente sulle infrastrutture di trasporto e sulle strade può essere valutato per fasi successive stimando la pericolosità, l’esposizione e la vulnerabilità e poi sovrapponendo le informazioni suddette. In questo senso un valido aiuto per l’elaborazione di questi dati, i quali sono tutti caratterizzati da una forte componente spaziale, deriva dall’impiego di strumenti GIS, i quali permettono facilmente di sovrapporre informazioni di vario genere.

Un approccio di tale tipo è riscontrabile nel lavoro di Cafiso e altri [13]. Gli autori, per diverse tipologie di rischio (sismico, vulcanico, idrogeologico, incendi, etc) e mediante l’ausilio di strumenti GIS, valutano attraverso tre successive fasi, la pericolosità, l’esposizione e la vulnerabilità di infrastrutture stradali, per arrivare infine a una valutazione del rischio totale sulle strade della provincia di Catania.

Laddove risulti difficile o complicata la realizzazione di una delle suddette carte si potrà procedere attraverso semplificazioni: il livello di rischio verrà quindi determinato mediante due soli parametri.

Ciò potrà essere fatto mediante una sovrapposizione delle due cartografie di sintesi o incrociando le classi dei diversi parametri (ad esempio incrociando le classi di esposizione con i diversi livelli di pericolosità) e arrivando in tale modo alla determinazione di diverse classi di rischio. Per la valutazione del danno potranno essere sovrapposte la carta dell’esposizione e la carta della vulnerabilità delle infrastrutture stradali, e arrivare in questo modo ad una perimetrazione delle aree dove il danno atteso risulta maggiore, tali aree risulteranno quelle dove si potrà intervenire nella ricerca di



itinerari alternativi, oppure eventualmente predisporre ulteriori e specifici accertamenti e contestuali interventi di manutenzione ordinaria o straordinaria.

Una volta arrivati a una quantificazione del rischio sulle infrastrutture stradali dovranno essere stabiliti contestualmente i metodi di gestione dello stesso, nonché il livello di accettabilità. Laddove il livello di rischio risulta troppo elevato per poter essere giudicato accettabile, si procederà alla ricerca di alternative di percorso o alla definizione di interventi di manutenzione.

Nella tabella 2 si sintetizzano le tre fasi predette, gli strumenti utilizzati in ciascuna e gli elaborati di sintesi che dovrebbero produrre. Dei tre momenti si parlerà in maniera più approfondita nei successivi paragrafi.

**Tabella 2 Valutazione finale del rischio.**

FASI	SOTTOFASI	STRUMENTI	ELABORATI FINALI
<b>PERICOLOSITA'</b>	Distinte in base alle tipologie di rischio cui è esposto il territorio	Dati storici Carte geologiche Studi specifici Monitoraggi	Carta della pericolosità
<b>ESPOSIZIONE</b>	Esposizione diretta	TGM Flusso di traffico orario	Carta dell'esposizione delle lifelines
	Esposizione indiretta	Popolazione Manufatti Beni	
<b>VULNERABILITA'</b>	Vulnerabilità di rete	Indicatori e indici di vulnerabilità	Carta della vulnerabilità delle lifelines
	Vulnerabilità funzionale		
	Vulnerabilità strutturale		

### **1.7. VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ.**

Il primo passo per la valutazione del livello di rischio insistente sulle infrastrutture stradali consiste quindi nella valutazione della **pericolosità**. Essa consta, in linea di massima nella previsione dell'evento e dei suoi possibili effetti.

La pericolosità è una misura capace di valutare il livello di attesa rispetto al verificarsi di un determinato evento e cerca di stabilirne l'entità, ovvero la magnitudo, nonché la definizione spaziale e temporale dello stesso. Detto in altre parole, uno studio

approfondito della pericolosità dovrebbe essere in grado di stabilire dove, come e con quali conseguenze si potrà verificare un determinato evento.

Una prima e semplice valutazione della pericolosità in una regione può essere fatta elencando tutti i possibili eventi pericolosi che possono interessare il sistema dei trasporti, e in un secondo momento specificando dove e come questi eventi accadranno. Questo può essere fatto utilizzando principalmente due prospettive [22]: si possono identificare i rischi potenziali in una regione e sovrapporre tali rischi con la rete stradale, in questo modo si identificano i punti dove la rete è soggetta ad un evento rischioso. D'altra parte, si può focalizzare l'attenzione su un singolo collegamento della rete ed elencare per questo tutti i possibili eventi ai quali può essere soggetto. Per la redazione della mappe del rischio è necessaria una metodologia e anche in questo caso si possono identificare due tipologie di approccio: nella prima gli studiosi, attraverso equazioni che descrivono il fenomeno, ricostruiscono il modello che governa il processo fisico allo studio. Nel secondo caso si tratta di un metodo empirico: la valutazione della pericolosità viene fatta attraverso la ricostruzione della serie di dati storici che hanno interessato una determinata area, in questo modo gli studiosi arrivano a determinare le condizioni che possono portare al verificarsi dell'evento. In realtà le differenze tra questi due approcci spesso e volentieri non sono molto evidenti.

Quello che è chiaro è che per arrivare a una valutazione della pericolosità insistente sulla rete stradale si rende assolutamente necessaria una collaborazione con tecnici del settore i quali arriveranno a determinare tutte le dimensioni coinvolte nell'analisi della pericolosità, di cui le più importanti sono la scala spaziale e la scala temporale dell'evento.

La tabella 3 è stata realizzata per alcune tipologie di eventi, e suggerisce, a seconda degli stessi, i dati e le elaborazioni che possono essere utilizzate per arrivare alla realizzazione di una carta finale della pericolosità. Chiaramente essa non esaurisce né gli eventi che possono verificarsi in un determinato territorio, né tanto meno i dati necessari per l'elaborazione della cartografia finale di sintesi. Maggiori sono i dati e le conoscenze a disposizione, maggiore è il livello di dettaglio e di affidabilità raggiunto dalla carta stessa.

La scala di rappresentazione delle carte di pericolosità viene valutata a seconda dell'estensione del territorio in esame, dipenderà da essa anche il livello di dettaglio e di

informazioni rappresentabili. All'interno della carta le diverse parti del territorio saranno distinte in base alle classi di pericolosità che le contraddistinguono.

**Tabella 3. Valutazione della pericolosità.**

EVENTI	DATI UTILIZZABILI	ELABORAZIONI FINALI
<b>PERICOLOSITA' SISMICA</b>	Dati serie storiche eventi	<b>Carta macrozonazione sismica</b> <b>Carta microzonazione sismica</b>
	Caratteristiche sismologiche e sismogenetiche del territorio	
	Caratteristiche geologiche e geomeccaniche del terreno	
<b>PERICOLOSITA' VULCANICA</b>	Dati serie storiche eventi	<b>Carta della pericolosità vulcanica</b>
	Carte geologiche	
	Studi geologici	
	Fotografie aeree	
<b>PERICOLOSITA' IDROGEOLOGICA</b>	Dati serie storiche eventi	<b>Carta suscettibilità alla frana</b>
	Carte geologiche	
	Studi del terreno	
	Fotogrammetrie	
	Ispezioni e monitoraggi	
	Analisi di stabilità dei pendii	<b>Carta della suscettibilità a esondazioni</b>
	Dati serie storiche eventi	
<b>VALANGHE</b>	Diagrammi statistici e distribuzione spaziale degli eventi	<b>Carta della suscettibilità a valanghe</b>
	Dati serie storiche eventi	
	Carte topografiche	
	Fotografie aeree	
	Carte geologiche	
	Carta della vegetazione	
	Carte meteo e precipitazioni nevose	
	Studi e monitoraggi sul sito	

### **1.8. VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE.**

Il secondo passo che deve essere fatto per la valutazione del rischio, dopo l'analisi della pericolosità, è la valutazione dell'esposizione.

Lo studio dell'esposizione permette di individuare aree particolarmente sensibili per la presenza di persone, manufatti, beni, ecc.. La distribuzione di tali elementi a rischio chiaramente non è uniforme nel territorio, risulta maggiore dove maggiore è la

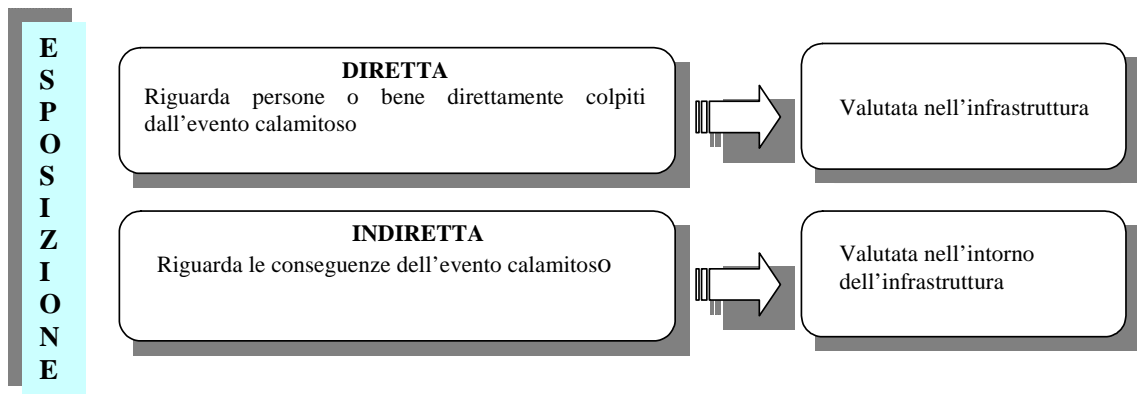
densità della popolazione, o dove maggiore è la concentrazione di particolari manufatti (per esempio nelle aree industriali). Com'è chiaro, popolazione, manufatti e beni non possiedono lo stesso grado di priorità, infatti la salvaguardia della vita umana possiede sempre un'importanza maggiore.

Per manufatti si intendono tutte le opere realizzate dall'uomo, tali opere vanno studiate in termini di funzionalità, ovvero valutando la funzione e l'importanza che esse hanno nell'area in esame. Ad esempio è chiaro che ospedali, caserme dei vigili del fuoco, strutture della protezione civile possiedono un'importanza maggiore perchè devono trovarsi in condizioni operative ed efficienti dopo un evento. Per beni si intendono invece l'insieme delle risorse necessarie per lo svolgimento della vita quotidiana (energia elettrica, acqua, merci di produzione, ecc).

L'analisi dell'esposizione della popolazione, oltre a rappresentare il passo principale da svolgere risulta anche quello maggiormente difficile. Infatti la popolazione non può essere considerata solo come un'entità statica, ma essa possiede una sua dinamicità, data dalla possibilità che ha di spostarsi nel territorio. Per questa ragione esisteranno diverse aree, soprattutto in ambito urbano, che risultano particolarmente esposte perchè sede di attività lavorative; inoltre questa esposizione varia nel tempo in maniera ciclica, per cui l'esposizione avrà anche una dimensione temporale, oltre che spaziale.

Si è visto che il sistema dei trasporti, e quindi la rete stradale, è l'unica lifelines nella quale si muovono le persone, oltre che i beni. Per questa ragione le infrastrutture stradali, oltre che essere manufatti esposti a rischio, espongono la popolazione che li utilizza.

In virtù di ciò, parlando di esposizione in riferimento al sistema dei trasporti, si può distinguere tra **esposizione diretta e indiretta**. Si parla di esposizione diretta quando a subire danni sono gli utenti che utilizzano una data strada che riporta danni in seguito al verificarsi dell'evento, cioè persone o beni direttamente colpiti dall'evento calamitoso. È noto però come un'infrastruttura di trasporto sia profondamente legata al territorio che serve. In particolare un sistema dei trasporti inefficiente genera diverse conseguenze, per esempio danni economici, o ritardi nell'erogazione dei soccorsi durante le emergenze. Si parla in questo caso di esposizione indiretta: è chiaro come i beni che possono essere esposti indirettamente sono valutabili attraverso un'indagine di più ampio raggio rispetto all'area di crisi.



**Figura 4. Tipologie di esposizione al rischio.**

Per la valutazione dell'esposizione diretta di una infrastruttura stradale si può far riferimento al **traffico giornaliero medio** [12] che dovrebbe essere in grado di rappresentare le condizioni ordinarie della circolazione. Chiaramente, maggiore è il valore del traffico giornaliero medio, maggiore è l'esposizione dell'infrastruttura in esame. All'arco stradale o all'itinerario in questione si può quindi associare un indice di esposizione direttamente proporzionale al valore del TGM che lo caratterizza. Va tuttavia considerata la possibilità che quell' infrastruttura, in condizioni di esercizio straordinarie (terremoto, o attentati, ad esempio), possa essere caratterizzata da carichi di traffico ben maggiori di quelli medi, sicché, caso per caso, va valutato attentamente il valore del TGM da utilizzare.

Altra grandezza rappresentativa dell'esposizione è il **flusso orario**. L'iter per arrivare alla definizione di una carta finale è analogo a quello descritto in precedenza: in base ai valori massimi e minimi assunti dai flussi veicolari si determinano diverse classi di esposizione; ad ogni ramo della rete verrà attribuito un certo valore di esposizione in base alla classe di appartenenza.

Un esempio di valutazione dell'esposizione indiretta si trova sempre nel lavoro di Cafiso e altri [13] In questo caso il parametro utilizzato per la valutazione viene assegnato al ramo della rete in funzione del numero di persone potenzialmente colpite dalla mancata funzionalità del ramo e anche in funzione del livello di pericolosità sismica del centro considerato. In sostanza l'approccio utilizzato dagli autori si sviluppa secondo i seguenti passi:

1. all'interno dell'area in esame si identificano i centri di origine e destinazione dei soccorsi;
2. ad ogni centro urbano corrisponde un indice di rischio sismico assegnato al comune secondo il D.P.C.M. n.2788. Tale indice può assumere valori compresi tra 0 e 0,8 e dipende dalla percentuale di popolazione coinvolta in crolli e dalla percentuale di patrimonio danneggiato;
3. all'interno della rete stradale si individuano le infrastrutture viarie con caratteristiche di lifelines che colleghino i diversi centri;
4. a ogni centro urbano viene assegnato un carico di esposizione sismica dato dal prodotto tra la popolazione residente e l'indice di rischio definito in precedenza;
5. a ciascun ramo della rete viene assegnato un indice di esposizione dato dalla sommatoria dei carichi dei centri urbani serviti dal ramo stesso.

In questo modo le infrastrutture individuate come lifelines saranno tutte caratterizzate da un indice di esposizione. Il risultato finale di tale analisi consiste nella realizzazione di una carta dell'esposizione sismica delle lifelines.

Sebbene la metodologia individuata dagli autori sia specificatamente studiata per il rischio sismico in realtà si potrebbe applicare anche per altre tipologie di rischio, ad esempio considerando solamente la popolazione residente e attribuendo a ciascun ramo la sommatoria della popolazione residente dei centri urbani serviti dal ramo stesso.

Si potrebbe inoltre pensare di inserire in tale ragionamento anche la valutazione dei beni e dei manufatti serviti da quella infrastruttura; chiaramente in questo caso aumenterà la complessità nella valutazione dell'indice. Innanzitutto, occorrerebbe attribuire un peso ad ogni parametro dell'indice. In ogni caso, infatti, si ritiene che la salvaguardia dell'incolumità delle persone possegga un ordine di priorità maggiore rispetto ai manufatti o ai beni. In secondo luogo, andrebbe valutata la sostanziale differenza esistente all'intero di ogni categoria, come quella dei beni o dei manufatti. Una volta arrivati a definire tale indice l'iter per la realizzazione della carta di esposizione risulta del tutto simile a quello descritto per la valutazione dell'esposizione diretta.

Infine, è auspicabile la realizzazione di una tavola di sintesi che possa arrivare alla realizzazione di un indice complessivo, per ogni arco o tronco della rete, direttamente

proporzionale sia ai valori dell'esposizione diretta che a quelli dell'esposizione indiretta dell'arco stesso.

**Tabella 4 Valutazione dell'esposizione (elaborazione da Cafiso e altri, [13] )**

<b>VALUTAZIONE ESPOSIZIONE</b>		
<b>Tipologie di esposizione</b>	<b>INDIRETTA</b>	<b>DIRETTA</b>
<b>Dati utilizzabili</b>	Popolazione residente Manufatti Beni	TGM Flusso orario
<b>Fasi della valutazione</b>	Calcolo di un indice di esposizione di ogni centro	Suddivisione in classi di esposizione in base al valore del TGM o del Flusso Orario
	Individuazione delle lifelines di collegamento tra centri	Attribuzione a ogni tronco della rete di un valore di esposizione in base alla classe di appartenenza
	Attribuzione a ogni ramo della rete di un indice di esposizione dato dalla sommatoria dei carichi dei centri urbani serviti dal ramo	

## 2. VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA'

Ultimo passo per arrivare a una definizione completa del rischio è la valutazione della vulnerabilità. Lo studio della vulnerabilità delle infrastrutture di trasporto costituisce un tema importante e di crescente interesse nell'ambito delle infrastrutture stradali. Il concetto di vulnerabilità non possiede una definizione univoca e comunemente accettata, ma deve essere definita a seconda dei contesti. Esistono quindi diverse definizioni di vulnerabilità in letteratura, così come esistono diverse modalità per valutarla.

### 2.1. LE DEFINIZIONI DI VULNERABILITÀ

Una definizione generale di vulnerabilità associa a quest'ultima il grado di perdita di un dato elemento o di un gruppo di elementi a rischio, risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data magnitudo. Secondo questa definizione la vulnerabilità può essere espressa in una scala che va da 0 (nessun danno) a 1 (perdita totale)

Altra definizione di vulnerabilità [13] valuta la propensione di beni, persone o attività a subire danni, o comunque modificazioni in seguito al verificarsi dell'evento. La vulnerabilità in questo senso può essere vista come una misura della perdita di efficienza del sistema territoriale e la capacità residua di esplicare ancora le funzioni proprie del sistema. La vulnerabilità è quindi una propensione degli elementi o di sistemi complessi a subire danni in relazione alle proprie caratteristiche intrinseche. Sempre Cafiso e altri [13] differenziano in **vulnerabilità diretta** e **vulnerabilità indotta** per quanto riguarda il rischio sismico. La prima misura la propensione di un singolo elemento, semplice o complesso a subire danni, o collassare a seguito all'evento sismico. La seconda si riferisce invece agli effetti della crisi dell'organizzazione del territorio.

A queste definizioni di vulnerabilità D'Andrea e Condorelli [27] ne aggiungono di altre, in particolare si parla di **vulnerabilità differita** in riferimento agli effetti che si manifestano in una fase successiva all'evento, che creano disagi dovuti all'impossibilità di usufruire di alcune infrastrutture, delle proprie abitazioni, o ancora dall'interruzione di diverse attività produttive e lavorative dell'area. Inoltre è introdotto dagli stessi autori il concetto di **vulnerabilità funzionale** che si riferisce ai danni, valutabili anche nel



lungo periodo, che derivano dalla mancata funzionalità di alcuni elementi, e di **vulnerabilità socioeconomica**. Quest'ultima deriva direttamente dalle condizioni sociali, economiche, politiche che caratterizzano il territorio colpito dall'evento, infatti tali condizioni determinano le modalità e i tempi di ripresa delle aree interessate da eventi disastrosi.

In ogni caso, gli autori fin qui citati tendono a sottolineare come la vulnerabilità da essi considerata si riferisca alle caratteristiche intrinseche dell'infrastruttura, e risulti del tutto indipendente da altri fattori esterni. In questo modo si opera una netta distinzione tra caratteristiche dell'area di studio che sono direttamente relazionate alla pericolosità, e caratteristiche di un manufatto, che determinano invece la vulnerabilità. Un concetto che gli autori relazionano alla vulnerabilità è il **danno**, il quale rappresenta la perdita di funzionalità, che può essere parziale o totale, che può subire una struttura a causa del verificarsi dell'evento. In questo senso il danno risulta come combinazione tra pericolosità e vulnerabilità e del tutto indipendente dall'esposizione.

Altri autori [60], sempre in riferimento agli eventi sismici, differenziano tra **vulnerabilità intrinseca** e **vulnerabilità estrinseca**. La prima si riferisce a valori caratteristici degli elementi che costituiscono l'infrastruttura, la seconda valuta la vulnerabilità di elementi che non fanno parte del solido stradale, ma il cui collasso, data la vicinanza a quest'ultimo, può compromettere la stabilità della strada, o causarne la chiusura. Entrambe queste due tipologie sono vulnerabilità strutturali, perchè riferite alle caratteristiche strutturali del solido stradale e dei manufatti prospicienti ad esso.

Cutter e altri [25] nella valutazione della vulnerabilità di una regione fanno uso dei concetti di **vulnerabilità biofisica** e **vulnerabilità sociale**. In particolare la vulnerabilità regionale è data dall'interazione di questi due fattori. La vulnerabilità biofisica si riferisce all'identificazione dei possibili rischi, della loro frequenza e della loro magnitudo. In questo senso la vulnerabilità biofisica non è altro che quella finora descritta come pericolosità, inoltre tale concetto è senz'altro avvicinabile a quello di vulnerabilità naturale che verrà esposto in seguito [13]. La vulnerabilità sociale deriva dalle attività e dalle circostanze che definiscono il tessuto sociale in una regione e dalle sue trasformazioni. Il concetto di vulnerabilità sociale è simile a quello di vulnerabilità socioeconomica espresso da d'Andrea e Condorelli [27]. In particolare, per Cutter e altri, i fattori che possono essere presi in considerazione per determinare la vulnerabilità sociale sono:

- impossibilità di usufruire delle risorse, incluse l'informazione e le conoscenze;
- accesso limitato alla rappresentazione e al potere politico;
- costumi e credenze;
- caratteristiche dell'edificato;
- benessere economico e sociale;
- caratteristiche delle infrastrutture e delle lifelines.

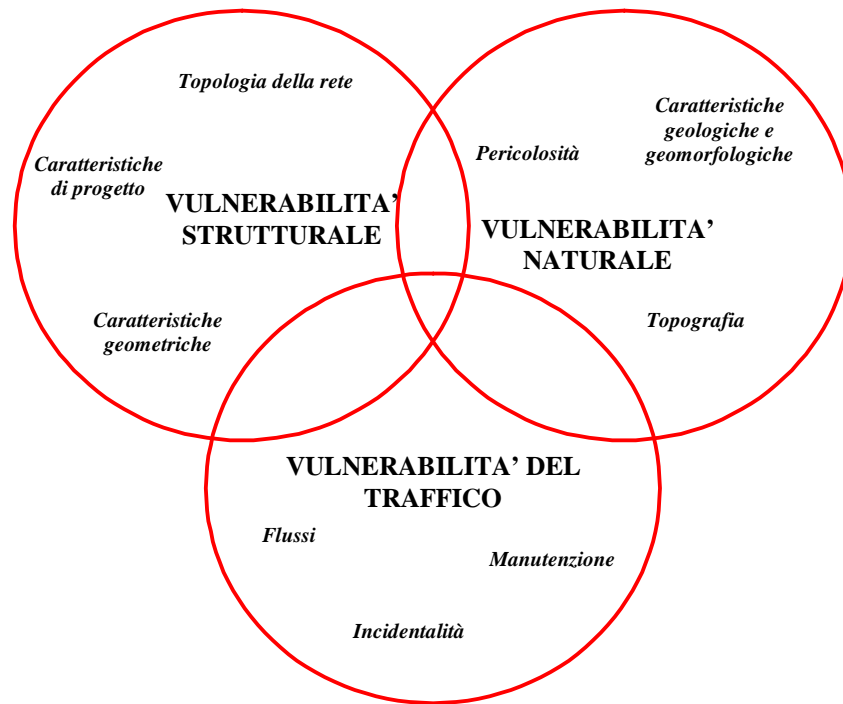
Per quanto riguarda la vulnerabilità di una rete di trasporto ancora non è possibile individuare una definizione che sia comunemente accettata da tutti. Ciò che invece appare chiaro, e che viene riportato da diversi autori, è che gli studi sulla vulnerabilità di una rete dovrebbero concentrarsi più sulla conseguenza dell'evento, che sull'evento in se.

Husdal [32] identifica tre tipologie di vulnerabilità a cui può essere soggetta una rete stradale:

- **vulnerabilità strutturale**, che si riferisce alla strada in se stessa , e quindi alle sue caratteristiche costruttive, in termini, ad esempio, di larghezza, di caratteristiche geometriche e di progetto, di presenza e caratteristiche delle opere d'arte (ponti, gallerie, tombini, etc);
- **vulnerabilità naturale**, che si riferisce alle caratteristiche del territorio attraversato della strada e ai rischi naturali che lo contrassegnano;
- **vulnerabilità relativa al traffico o generata dal traffico**, che si riferisce alle caratteristiche che descrivono il flusso di traffico e le condizioni risultanti al variare di quest'ultimo in particolari situazioni (ore di punta, particolari giorni della settimana, operazioni di manutenzione, etc).

Una rete stradale può essere soggetta ed esposta contemporaneamente a queste tre tipologie di vulnerabilità che possono interagire tra di loro, e aumentare conseguentemente il livello di vulnerabilità globale. Sempre secondo Husdal [32], relazionarsi al concetto di vulnerabilità significa essenzialmente rispondere a tre domande, che identificano il rischio a cui la rete è vulnerabile, dove la rete è vulnerabile e in che modo risulta vulnerabile. In particolare l'Autore differenzia il concetto di vulnerabilità da quello di affidabilità: se infatti l'affidabilità attiene al funzionamento

degli archi che compongono la rete, e può essere vista come una misura del grado di stabilità della rete stessa, la vulnerabilità invece è legata alle conseguenze date dal collasso o dal malfunzionamento di un arco: in questo senso la vulnerabilità viene vista come una semplice misura delle conseguenze. Quindi misure di affidabilità non corrispondono, secondo l'autore, a misure di vulnerabilità.



**Figura 5** Tipologie di vulnerabilità secondo Husdal [32]

Altri autori non stabiliscono invece una differenza così netta tra **affidabilità** e vulnerabilità [7], intendendo per vulnerabilità di un sistema di trasporto l'affidabilità, ovvero la possibilità di poter garantire l'utilizzo della rete sotto determinate condizioni e in un dato periodo di tempo ("serviceability"). In questo senso misure dell'affidabilità di una rete possono rappresentare uno strumento per valutare la vulnerabilità della rete stessa, e l'affidabilità viene vista come un complemento della vulnerabilità. Sempre Berdica [7] definisce la vulnerabilità come la suscettibilità di una rete di trasporto agli incidenti, dove per incidente si intende un evento che può direttamente o indirettamente causare una riduzione o una diminuzione della "serviceability". Altri termini che l'Autrice riconduce alla vulnerabilità sono la **resilienza** ("resilience") ovvero la capacità di raggiungere un nuovo stato di equilibrio a seguito di un incidente e la **ridondanza** ("redundance"), ovvero la duplicazione di componenti all'interno della rete che possono continuare a lavorare nel caso che una parte della rete sia in condizioni non operative. Ritornando invece al concetto di affidabilità si può ancora distinguere tre tipologie

diverse che vengono studiate con metodologie differenti. L'affidabilità legata alla **connettività** ("reliability of connectivity"), che valuta la probabilità che tutti quelli che utilizzano la rete possano raggiungere la località di destinazione; l'affidabilità legata al **tempo di viaggio** ("reliability of travel time") ovvero la probabilità di poter raggiungere la destinazione prefissata in un dato periodo di tempo, e infine la l'affidabilità legata alla **capacità** (capacity reliability), ovvero la probabilità che la rete possa smaltire un certo ammontare di traffico. Misure di queste tipologie di affidabilità possono quindi costituire misure di vulnerabilità.

Altri autori [9] legano il concetto di vulnerabilità alla **configurazione della rete** e al suo disegno, arrivando, attraverso diverse simulazioni, a capire quale schema funzionale di una rete risulti maggiormente vulnerabile rispetto ad altri, sottoposto a diverse condizioni di traffico e a diverse interruzioni dovute ad incidenti.

Il concetto di vulnerabilità ancora può essere legato a quello di **accessibilità** [59] intesa come la connessione tra una particolare origine e una destinazione, o l'accesso a diverse zone o parti della rete. Gli autori in particolar modo concentrano l'attenzione sulla vulnerabilità del nodo della rete: un nodo diventa vulnerabile se la perdita o il sostanziale deterioramento di un piccolo numero di archi diminuisce in maniera significativa l'accessibilità al nodo, la quale viene misurata attraverso un indice di accessibilità. La vulnerabilità in questo modo può essere definita in termini di qualità globale di accesso da un dato nodo ad altre parti della rete.

In particolare Taylor e D'Este [58] rimarkano la differenza esistente tra vulnerabilità e affidabilità. Essi infatti legano il concetto di vulnerabilità alle conseguenze dell'evento (ad esempio la chiusura di un arco stradale), mentre il concetto di affidabilità è legato alla probabilità che l'evento possa accadere. Quindi, sebbene l'affidabilità di una rete e la vulnerabilità siano concetti in relazione, è anche chiaro come la vulnerabilità si concentri sulla debolezza della rete e sulle conseguenze date dalla chiusura di una parte di essa. Al contrario l'affidabilità interessa maggiormente i concetti di probabilità e connettività. In qualche modo può essere osservato come le posizioni espresse da Taylor e D'Este possano essere avvicinabili a quelle presenti sia nei lavori di Husdal [32], che nei lavori di Cafiso e altri [13] e D'Andrea e Condorelli [27]. Infatti l'affidabilità interpretata come probabilità che un evento si verifichi, può anche essere intesa come pericolosità, e in questo senso si riferisce alle caratteristiche dell'area di studio, e risulta qualcosa di differente rispetto alla vulnerabilità, la quale

viene invece valutata in termini di debolezza dell'elemento tenendo conto o delle sue caratteristiche intrinseche o delle conseguenze date dalla sua chiusura.

Anche Berdica e altri [8] studiano la vulnerabilità associandola al concetto di accessibilità e utilizzano indicatori di accessibilità per identificare gli archi maggiormente critici e vulnerabili di una rete. Infine Jenelius e altri [35] riportano il concetto di vulnerabilità a quello di **criticità** dei diversi componenti che costituiscono la rete. Maggiore è la criticità di un componente, maggiore sarà il danno causato all'intero sistema quando quest'ultimo collassa. La criticità per l'autore è data dalla concomitanza di due fattori: la debolezza e l'importanza dell'elemento. Detto in altre parole un elemento della rete può definirsi critico se è contemporaneamente “debole”, (ovvero la probabilità di incidente che lo caratterizza è alta), e “importante” (se le conseguenze dovute alla sua perdita sono rilevanti e si ripercuotono sull'intero sistema). In questo senso, attraverso opportuni indicatori può essere valutata **l'esposizione** dei nodi (che possono rappresentare i comuni di un territorio) e l'esposizione degli archi di una rete di trasporto.

Riassumendo, si può dire che il concetto di vulnerabilità, come scaturisce da questa breve descrizione, risulta particolarmente vario e applicabile a diversi campi. In particolare, se consideriamo una scala di analisi decrescente si può parlare di vulnerabilità di una regione, di vulnerabilità di un'intera rete (che può discendere da un particolare disegno rispetto che un altro), di vulnerabilità di elementi che costituiscono la rete (archi, collegamenti, nodi), di vulnerabilità dovuta alle caratteristiche progettuali, costruttive e strutturali di un particolare tronco della rete stradale o di un particolare manufatto (ponti, gallerie, rilevati, etc).

Inoltre al concetto di vulnerabilità, in particolare di vulnerabilità di una rete stradale, possono essere associati tutta una serie di termini e ambiti connessi, come l'affidabilità, l'accessibilità, la resilienza, la connettività, la capacità, l'esposizione. Lo studio di questi ambiti, anche se in alcuni casi differenti tra di loro, possono costituire comunque misure di vulnerabilità.

Ancora nella bibliografia esaminata può essere ravvisabile una sostanziale distinzione tra Autori che considerano il concetto di vulnerabilità come a se stante, dipendente solamente dalle caratteristiche intrinseche dell'elemento e non legato alla probabilità che un evento si verifichi (pericolosità) e quegli Autori che invece valutano la vulnerabilità mediante misure di affidabilità.

Le tabelle 5 e 6 sintetizzano le definizioni e i concetti finora esposti.

Tabella 5 Alcune delle tipologie e definizioni di vulnerabilità in letteratura

<b>TIPOLOGIE DI VULNERABILITA'</b>	<b>DEFINIZIONE</b>	<b>FONTE</b>
<b>vulnerabilità diretta</b>	<i>“propensione di un singolo elemento semplice o complesso a subire danni o collasso a seguito di una scossa sismica”</i>	- Cafiso e al. [13] - D’Andrea e Condorelli [27]
<b>vulnerabilità indotta</b>	<i>“si riferisce agli effetti della crisi dell’organizzazione del territorio provocati dal collasso di uno o più elementi che lo costituiscono”</i>	- Cafiso e al. [13] - D’Andrea e Condorelli [27]
<b>vulnerabilità differita</b>	<i>“si riferisce a tutti gli effetti che si manifestano nelle fasi successive dell’evento sismico tali da modificare ... le abitudini e il comportamento delle popolazioni insediate”</i>	- D’Andrea e Condorelli [27]
<b>vulnerabilità funzionale</b>	<i>si riferisce alla mancata funzionalità di alcuni elementi che potrebbe provocare ingenti danni a seguito di un evento calamitoso</i>	- Cafiso e al. [12] - D’Andrea e Condorelli [27]
<b>vulnerabilità socioeconomica o vulnerabilità sociale</b>	<i>si riferisce condizioni sociali, economiche, politiche che caratterizzano il territorio colpito da un evento e che determinano le modalità e i tempi di ripresa</i>	- Cutter e al. [25] - Odeh [51] - D’Andrea e Condorelli [27]
<b>vulnerabilità estrinseca</b>	<i>si riferisce alla vulnerabilità di elementi che non fanno parte del corpo stradale, ma il cui collasso può compromettere la stabilità della strada, o causarne la chiusura</i>	- Tesoriere e al. [61]
<b>vulnerabilità intrinseca</b>	<i>si riferisce a valori caratteristici degli elementi che costituiscono un’infrastruttura</i>	- Tesoriere e al. [61]
<b>vulnerabilità strutturale</b>	<i>si riferisce all’infrastruttura in se stessa , e alle sue caratteristiche costruttive</i>	- Cafiso e al. [12] - Husdal [32] - Husdal [33]
<b>vulnerabilità naturale o biofisica</b>	<i>si riferisce alle caratteristiche del territorio e ai rischi naturali che lo contrassegnano</i>	- Cutter e al. [23] - Husdal [32, 33]
<b>vulnerabilità del traffico</b>	<i>si riferisce alle caratteristiche che descrivono il flusso di traffico e le condizioni risultanti al variare di quest’ultimo</i>	- Husdal [32, 33]
<b>vulnerabilità del nodo</b>	<i>“un nodo diventa vulnerabile se la perdita o il sostanziale deterioramento di un piccolo numero di archi diminuisce in maniera significativa l’accessibilità al nodo”</i>	- Taylor e D’Este [59]

Tabella 6 Concetti legati a quello di vulnerabilità

CONCETTI RELAZIONATI	DEFINIZIONE	FONTE
<b>affidabilità (reliability)</b>	<i>possibilità di poter garantire l'utilizzo della rete sotto determinate condizioni e in un dato periodo di tempo</i>	- Nicholson e Du [49] - Bell [4] - Berdica [7] - Sumalee e Watling [57] - Campos e Silva [16] - Nicholson e Dalziel [50]
<b>resilienza (resilience)</b>	<i>capacità di raggiungere un nuovo stato di equilibrio a seguito di un incidente</i>	- Berdica ([7] - Bleuxx e al. [9]
<b>ridondanza (redundancy)</b>	<i>duplicazione di componenti all'interno della rete che possono continuare a lavorare nel caso che una parte della rete sia in condizioni non operative</i>	- Berdica [7] - Bleuxx e al. [9]
<b>connettività (reliability of connectivity)</b>	<i>probabilità che tutti quelli che utilizzano la rete possano raggiungere la località i destinazione</i>	- Berdica [7] - Bleuxx e al. [9]
<b>tempo di viaggio (reliability of travel time)</b>	<i>probabilità di poter raggiungere la destinazione prefissata in un dato periodo di tempo</i>	- Berdica [7] - Sumalee e Watling [57] - Bleuxx e al. [9]
<b>capacità (capacity reliability)</b>	<i>probabilità che la rete possa smaltire un certo ammontare di traffico</i>	- Berdica [7] - Bleuxx e al. [9]
<b>accessibilità</b>	<i>connessione tra una particolare origine e una destinazione, o l'accesso a diverse zone o parti della rete</i>	- Chang e Nojima [17] - Berdica e Eliasson [7] - Li [39] - Sohn [56]
<b>criticità</b>	<i>caratteristica della rete data dalla somma di debolezza e importanza</i>	- Jenelius e al. [35] - Jenelius e Mattsson [36]
<b>danno</b>	<i>rappresenta la perdita, totale o parziale, di funzionalità di un elemento a seguito di un evento</i>	- Cafiso e al. [13] - Tesoriere e al. [61] - D'Andrea e Condorelli [27]

## 2.2. METODOLOGIE PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ.

Le metodologie utilizzate in letteratura per la quantificazione della vulnerabilità dipendono dall'ambito in cui vengono applicate e dall'oggetto di studio, per questa ragione si riscontra una forte differenza tra i metodi proposti, derivante in parte dalla vastità dell'argomento trattato.

Andando ad analizzare le metodologie utilizzate per lo studio della vulnerabilità di una rete stradale si riscontra una certa varietà di approcci, valutata caso per caso anche attraverso esempi applicativi a reti esistenti.



Si è detto che la vulnerabilità di una rete può essere associata al livello di accessibilità, in questo modo le misure di accessibilità possono fornire una valutazione della vulnerabilità.

Per Taylor ed altri [59], ad esempio, una misura della vulnerabilità è rappresentata dalla variazione del costo generalizzato di trasporto, tra due nodi della rete quando un arco della rete smette di funzionare, in questo caso per costo generalizzato si intende una misura della disutilità creata dal collasso dell'arco, come l'aumento di distanze di percorrenza, del tempo di viaggio, del costo di trasporto. etc. In questo modo, considerando una rete di  $N$  nodi e  $E$  archi, nel caso del collasso di un arco vengono calcolate le variazioni dei tempi di percorrenza tra i diversi nodi della rete; ad ogni nodo viene quindi associato un valore, pesato in funzione degli spostamenti generati dal nodo stesso. Il risultato dello studio è quindi una matrice dove per ogni comune viene mostrata la perdita di accessibilità al comune stesso in caso di collasso di un arco. Nel caso specifico dello studio la perdita di accessibilità di una comunità che fa riferimento a una rete è valutata come :

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} v_{ijrs}$$

**Eq. 4**

dove:

- $v_{ijrs}$  è la differenza del costo generalizzato di trasporto, dal nodo  $i$  al nodo  $j$  quando il collegamento  $ers$  non è più funzionante;
- $d_{ij}$  sono gli spostamenti tra  $i$  e  $j$ .
- $v_{ijrs}$  a sua volta è dato dalla formula:

$$v_{ijrs} = s[ij, G(N, E)] - s[ij, G(N, E - e_{rs})]$$

**Eq. 5**

rappresentante la differenza del costo di trasporto lungo il percorso tra  $i$  e  $j$  nel caso di rete intatta e nel caso di rete funzionante senza il collegamento  $e_{rs}$ .

Il problema viene affrontato in maniera analoga da Jenelius e altri [35] [36]: anche in questo caso si suppongono interruzioni localizzate di alcuni archi della rete e vengono conseguentemente valutate le variazioni di accessibilità. In questo caso l'attenzione viene concentrata sia sulla valutazione dell'importanza rivestita dall'arco

all'interno della rete, sia dall'esposizione del comune (ovvero del nodo). Nello specifico l'importanza dell'arco viene valutata determinando per ognuno la sommatoria degli incrementi dei tempi di viaggio da ogni nodo pesati in base agli spostamenti generati dallo stesso nodo verso il nodo di destinazione. L'esposizione del comune invece viene valutata sempre in base agli incrementi del tempo di viaggio che il comune deve subire a causa della chiusura di uno o più nodi, e pesata attraverso gli spostamenti generati da quel comune. In questo modo importanza ed esposizione vengono interpretati come indici di vulnerabilità, sia del nodo che del collegamento. La base dalla quale vengono dedotte le misure di importanza ed esposizione è data dalla formula:

$$\Delta c_{ij}^{(e)} = c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)}$$

**Eq. 6**

dove:

$c_{ij}^e$  e  $c_{ij}^0$  rappresentano il costo di trasporto da un nodo  $i$  a un nodo  $j$  rispettivamente nel caso in cui un elemento della rete è sia interrotto e nella situazione iniziale di perfetto funzionamento della rete. In particolare l'autore distingue tra collegamenti che non determinano la separazione della rete in due parti ("no cut links") e collegamenti che, quando interrotti, determinano la separazione di una rete in due parti distinte ("cut links").

Nel caso dell'interruzione di un collegamento del primo tipo, può essere valutata l'importanza dello stesso attraverso la seguente formula:

$$\text{Importance}_{\text{net}}(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}}, k \in E^{nc}$$

**Eq. 7**

dove:

- $k$  è l'arco di cui si sta valutando l'importanza;
- $w_{ij}$  rappresentano i pesi che possono essere attribuiti per poter valutare l'importanza che i singoli nodi rivestono all'interno della rete;
- $Enc$  rappresenta l'insieme dagli archi che non determinano una separazione della rete.

Se si vuole considerare che tutti i nodi possiedano un'eguale importanza, allora i pesi sono posti tutti uguali.

Nel caso invece di un “cut link” viene valutata l'esposizione della rete facendo riferimento a quella che viene individuata come “domanda non soddisfatta”. La formula utilizzata in questo caso è del tipo:

$$\text{Importance}_{\text{net}}^{\text{uns}}(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} u_{ij}^{(k)}}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}}, k \in E$$

**Eq. 8**

dove:

$$u_{ij}^e = \begin{cases} x_{ij} & \text{se } c_{ij}^e = \infty, \\ 0 & \text{se } c_{ij}^e < \infty, \end{cases}$$

$u_{ij}^e$  è la domanda insoddisfatta nel caso in cui un collegamento non dovesse funzionare, mentre  $x_{ij}$  rappresenta la domanda di trasporto da un nodo  $i$  a un nodo  $j$ . Quindi la domanda insoddisfatta sarà uguale alla domanda di trasporto nel caso in cui l'arco interrotto determini un incremento del tempo di viaggio infinito.

Per quanto riguarda le caratteristiche relative a un nodo o di un gruppo di nodi (“municipalities”) gli autori valutano quella che viene definita esposizione. L'esposizione, in particolare può essere dovuta al non funzionamento di un collegamento scelto a caso all'interno della rete, in questo caso viene valutata mediante la formula:

$$\text{Exposure}_{\text{rand}}(m) = \frac{\sum_{k \in E^{nc}} \sum_{i \in V_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{L^{nc} \sum_{i \in V_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij}},$$

**Eq. 9**

Dove:

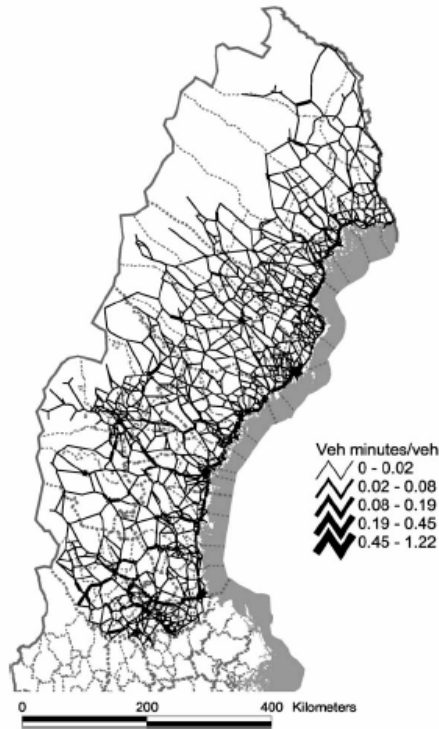
- $m$  è un'insieme di nodi;
- $V_{md}$  è l'insieme dei nodi all'interno della municipalità  $m$  che generano domanda;
- $L_{nc}$  è il numero di collegamenti che non determinano una separazione della rete.

Nel caso peggiore, ovvero quando si determina la chiusura dell'arco più importante per la rete l'esposizione della municipalità  $m$  viene determinata con la formula seguente:

$$\text{Exposure}_{\max}(m) = \max_{k \in E^{nc}} \frac{\sum_{i \in V_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_{i \in V_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij}},$$

**Eq. 10**

Le misure di importanza e di esposizione realizzate da Jenelius vengono poi applicate in una rete stradale esistente localizzata nel Nord della Svezia (fig. 6).



**Figura 6** Importanza dei collegamenti valutata con l'eq. 8 (Jenius e al. 2005)

Berdica e altri [8] valutano sempre la vulnerabilità legandola al concetto di accessibilità e in particolare misurano la variazione della stessa nel passaggio da una situazione normale a una situazione di crisi generata dalla chiusura di un arco. Per questa finalità in particolare viene utilizzata una misura di accessibilità detta “logsum”, un valore medio pesato del costo generalizzato di trasporto valutato per tutti i modi di trasporto e per tutte le destinazioni, i nodi e le destinazioni sono pesate in funzione di quanto risultano attrattive.

Yan Li [39] propone invece un indicatore di probabilità di accessibilità che fornisca una misura della connettività ai centri da cui partono le operazioni di soccorso e emergenza. Tale misura di connettività è definita dall'Autore come "Probabilità di Accesso". Ciascun ramo della rete possiede una certa probabilità di essere bloccato, che risulta direttamente proporzionale sia alla magnitudo del disastro, che alle caratteristiche della strada stessa, (nel caso specifico, trattandosi di rischio sismico, la probabilità di interruzione del ramo è direttamente proporzionale sia alla larghezza della strada che alla percentuale di case in legno lungo il suo percorso). La probabilità di accesso nel caso specifico proposto dallo studio è stimata utilizzando le tecniche di simulazione di Monte Carlo. Le misure di accessibilità proposte vengono poi applicate a una rete stradale urbana esistente della città di Beppu in Giappone.

Misure di accessibilità e indici di accessibilità possono essere anche utilizzati per valutare le prestazioni di una rete di trasporto in seguito a un evento calamitoso. In questo caso l'obiettivo proposto è quello di valutare gli impatti che si registrano in un dato territorio immediatamente dopo un evento critico. Questa prospettiva di studio di ritrova nei lavori di Chang [17] [18] che testano il modello analizzato in particolare riferendosi agli impatti generati dal terremoto di Kobe e comparandoli ad altri casi registrati di terremoti.

Nel lavoro in esame le prestazioni di una rete, sono valutate al tempo  $t$  dopo il terremoto, utilizzando la seguente formula:

$$D_{s,t} = \frac{f - R_{s,t}}{f - 1}$$

**Eq. 11**

dove:

- $D_{s,t}$  rappresenta una misura delle prestazioni della rete in termini di accessibilità;
- $s$  è l'unità spaziale su cui viene misurata la differenza di accessibilità;
- $f$  è una costante;
- $R_{s,t}$  è il rapporto di accessibilità di  $s$  al tempo  $t$ .

In questo caso  $D_{s,t}$  varrà 0 in caso di chiusura completa della rete di trasporto a seguito dell'evento e 1 in caso di nessun danno.

$R_{s,t}$  a sua volta è dato dalla formula:

$$R_{s,t} = \frac{1}{n_s} \sum_{i \in N_s} R_{i,t},$$

**Eq. 12**

dove:

- $R_{i,t}$  è il rapporto di accessibilità al tempo  $t$  per il nodo  $i$  della rete;
- $n_s$  è il numero di nodi presenti nell'unità spaziale  $s$  considerata;
- $N_s$  è il gruppo di nodi in  $s$ ;

Per come è calcolata quindi  $R_{s,t}$  non è altro che la media dei rapporti di accessibilità calcolati per i singoli nodi.

Infine  $R_{i,t}$  viene valutato utilizzando la formula:

$$R_{i,t} = \left[ \sum_{j \neq i} w_{ij} d_{ij} \right] \left[ \sum_{j \neq i} w_{ij} d_{ij}^* \right]^{-1}$$

**Eq. 13**

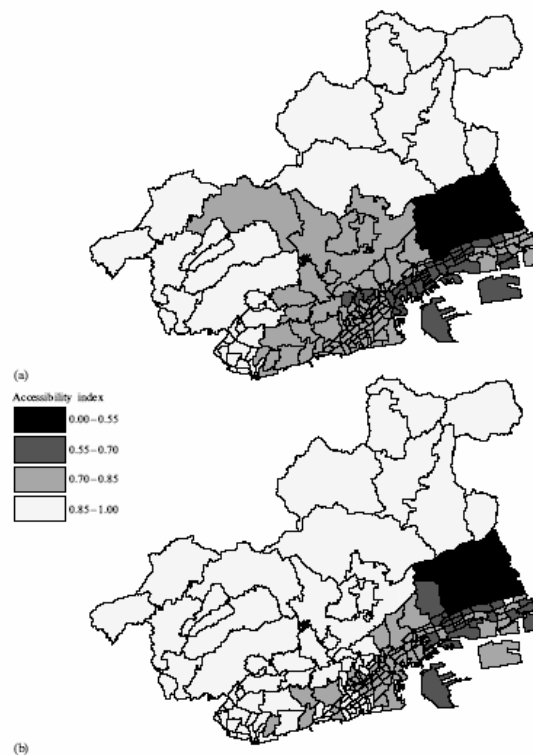
in questo caso:

- $d_{ij}^*$  rappresenta la distanza minima tra i nodi in caso di rete funzionante;
- $d_{ij}$  rappresenta la distanza minima tra i nodi  $i$  e  $j$  in caso di rete non funzionante a seguito dell'evento;
- $w_{ij}$  sono i pesi attribuiti ai nodi.

I pesi sono in questo caso calcolati in base ai volumi di traffico rilevati in censimenti precedenti, dal nodo  $i$  al nodo  $j$ . L'eq. 13 per alcuni aspetti mostra similitudini alle formule viste precedentemente (eq. 4, eq. 7). Tuttavia, in questo caso specifico, per la misura di accessibilità non viene scelto il variare del tempo di trasporto a causa della chiusura di un arco, ma l'aumentare della distanza tra nodo e nodo. In particolare sulla rete danneggiata dall'evento la distanza di ciascun collegamento danneggiato è stata valutata moltiplicando la distanza iniziale dell'arco per un moltiplicatore  $F(k)$  che dipende dallo stato di danneggiamento ( $k$ ) del link specifico e che viene utilizzato per quantificare l'aumento di tempo di viaggio necessario per attraversare un area danneggiata dall'evento sismico. La misura di accessibilità proposta dagli autori viene quindi applicata alla regione di Kobe, in

Giappone, teatro di uno dei più disastrosi terremoti registrati negli ultimi anni. L'Autrice inoltre, in altri lavori, mette a punto un altro indicatore di accessibilità [18], questa volta applicato nell'area di Seattle.

Si noti come le misure proposte in questo caso non valutino l'importanza o la vulnerabilità di una particolare arco o nodo della rete, ma consistano in una sorta di indice di vulnerabilità di una regione, costruito in base alle caratteristiche delle infrastrutture di trasporto dell'area. In questo senso il lavoro è più orientato a stabilire gli impatti post terremoto su una popolazione, e conseguentemente le priorità di riparazione nella rete e le differenze tra le strategie di riparazione (fig.7).



**Figura 7** Indice di accessibilità di Chang e differenze di due diverse strategie di riparazione della rete di trasporto [18]

Un altro studio che utilizza la variazione della distanza a seguito della rottura di un collegamento della rete come misura di accessibilità, è quello proposto da Sohn [56]. In particolare il lavoro, in maniera analoga a quanto visto sopra si propone di calcolare l'importanza dei singoli collegamenti in una prospettiva di riparazione degli stessi, per poterne stabilire il grado di priorità. La variazione di accessibilità per una contea è data dalla seguente formula:

$$A_i = 4 \times \left[ \alpha \frac{P_i}{\sum_{K=1}^{24} P_k} \sum_{j=1}^{23} \left( \frac{P_j}{\sum_{k=1}^{24} P_k} \frac{d_{ij}^{-\beta}}{\sum_{K=1}^{24} d_{ik}^{-\beta}} \right) + (1-\alpha) \frac{P_i}{\sum_{K=1}^{24} P_k} \sum_{j=1}^{23} \left( \frac{P_j}{\sum_{k=1}^{24} P_k} \frac{t_{ij}}{\sum_{K=1}^{24} t_{ik}} \right) \right]$$

Eq. 14

dove:

- $A_i$  è l'indice di accessibilità per la contea  $i$ ;
- $\alpha$  è uno scalare utilizzato come peso (compreso tra 0 e 1);
- $p_{i(j)}$  è la popolazione residente nella contea  $i$ ;
- $d_{ij}$  rappresenta la distanza minima tra la contea  $i$  e  $j$  a seguito di un determinato scenario;
- $d_{ij}^*$  rappresenta la distanza minima iniziale tra  $i$  e  $j$ ;
- $\beta = 0,44$  ed è ottenuto empiricamente;
- $t_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^n AADT_m d_m}{d_{ij}}$  è il traffico medio tra  $i$  e  $j$  misurato lungo il cammino minimo;
- $AADT_m$  è il traffico giornaliero medio calcolato lungo il link  $m$ ;
- $d_m$  è la lunghezza del link  $m$ .

Si nota chiaramente come l'equazione utilizzata in questo studio sia data dalla somma di due fattori: la distanza e il volume di traffico. Infatti la prima parte dell'equazione non tiene conto dell'importanza del collegamento correlata al volume di traffico che lo caratterizza, per questa ragione viene introdotta la seconda parte. Per ciascun cammino minimo viene perciò calcolato il volume di traffico medio. Nel caso specifico dello studio, dal momento che il TGM è registrato dalle autorità preposte per ciascun segmento della rete che possiede lunghezze diverse, la lunghezza del segmento è considerata come peso. Assumendo  $\alpha$  pari a uno l'indice dell'equazione 14 valuta l'accessibilità tenendo conto solo della variazione della distanza. Al decrescere di  $\alpha$  l'importanza di un collegamento in termini di volume di traffico assume un'importanza crescente. Inoltre in ciascun termine dell'equazione la popolazione viene utilizzata come peso.



La priorità di riparazione dei diversi collegamenti, e quindi l'importanza degli archi della rete viene calcolata in base a misure di accessibilità pre e post evento, mediante la seguente formula:

$$A^j = \sum_{i=1}^{24} A_i - \sum_{i=1}^{24} A_i^j = \sum_{i=1}^{24} (A_i - A_i^j)$$

**Eq. 15**

- $A^j$  è l'indice di accessibilità (vulnerabilità) dell'arco  $j$  quando questo è distrutto;
- $A_i$  è l'indice di accessibilità della contea  $i$  calcolato mediante l'eq. 14 in caso di funzionamento del collegamento  $j$ ;
- $A_i^j$  è l'indice di accessibilità della contea  $i$  calcolato mediante l'eq. 14 in caso di distruzione del collegamento  $j$ .

Per quanto attiene poi le modalità per studiare la vulnerabilità di una rete secondo le definizioni precedentemente esposte di affidabilità, in Berdica [7] e Bleukx [9] si possono trovare schematicamente riassunte alcune metodologie in riferimento ai concetti di affidabilità della connettività, del tempo di trasporto e della capacità.

Per quanto riguarda lo studio della vulnerabilità di una rete stradale urbana, Cafiso e altri [14] propongono un modello di valutazione della vulnerabilità dei rami di una rete stradale urbana durante un'emergenza di tipo sismico. La finalità è quella di individuare i percorsi viari meno vulnerabili per il raggiungimento delle aree attrezzate dei soccorsi. In questo caso la valutazione viene fatta su tronchi stradali urbani, dove per tronco si intende un tratto stradale privo di intersezioni al suo interno, e con caratteristiche omogenee. Per ogni tronco stradale la valutazione di un indice di danno complessivo viene realizzata mediante i seguenti passi:

1. viene valutato un indice di vulnerabilità geometrica del tronco stradale, definito in base alla larghezza della strada e al massimo della somma delle altezze degli edifici prospicienti il tronco stesso, la formula utilizzata è la seguente:

$$I_{gv} = \min[L - (H_1 + H_2)]$$

**Eq. 16**

dove:

- $L$  è la larghezza utile della strada;
- $H1$  e  $H2$  sono le altezze massime di due edifici affacciati adiacenti al tronco.

L'indice di vulnerabilità così calcolato rappresenta la larghezza residua che si avrebbe per il transito nel tronco stradale, nell'ipotesi più pessimistica che gli edifici più alti si ribaltino completamente sulla strada.

2. si valuta un indice di danno complessivo per il tronco stradale che tiene conto anche della vulnerabilità strutturale degli edifici che si trovano al margine della strada. In particolare ad ogni edificio viene associato un indice di danno ( $Ide$ ) in base alle classi di danno determinate dal Gruppo Nazionale Difesa Terremoti per la città di Catania. La formula utilizzata è la seguente:

$$Idc = \min[L - (Ide1 \times H1 + Ide2 \times H2)]$$

Eq. 17

Dove:

- $Ide1$  e  $Ide2$  sono gli indici di danno rispettivamente per l'edificio 1 e 2.

Le misure di vulnerabilità proposte sono state calcolate per parte della rete stradale urbana della città di Catania.

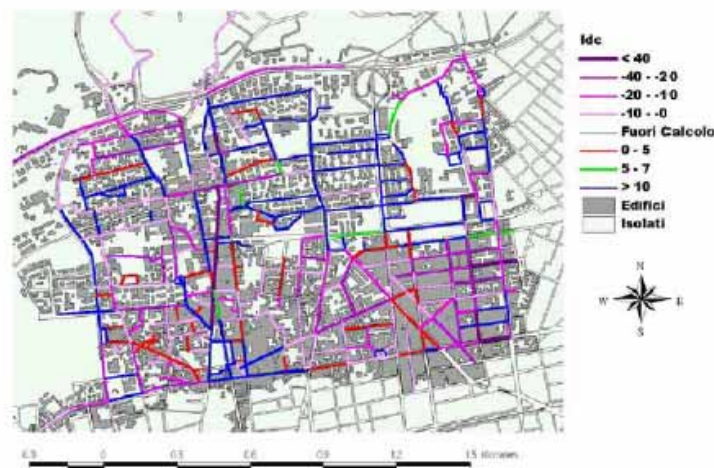


Figura 8 Indice di danno complessivo valutato per i tronchi stradali urbani [14]

Gli indici di vulnerabilità proposti da Taylor e d'Este [59], da Jenelius e altri [36], da Chang [17] e da Sohn [56] rappresentano in qualche modo misure di vulnerabilità funzionale di una rete stradale, in quanto valutano le conseguenze (in

termini di aumento dei tempi di percorrenze, o delle distanze) dovute al mancato funzionamento di un elemento costituente la rete. Per contro la metodologia indicata da Cafiso e altri [14] valuta invece una vulnerabilità di tipo strutturale, perchè costruita in base alle caratteristiche geometriche e strutturali rispettivamente del tronco stradale e degli edifici prospicienti.

La valutazione della vulnerabilità strutturale di tronchi stradali, ma anche di singoli manufatti, può esser fatta da un punto di vista qualitativo o quantitativo. Un'analisi di tipo quantitativo tende ad individuare indicatori e valori numerici che restituiscano un valore di vulnerabilità di un elemento. Le analisi qualitative, invece, consentono di esprimere un giudizio sulla vulnerabilità.

Uno strumento spesso utilizzato per le analisi qualitative sono le check list. Una metodologia per l'analisi speditiva della vulnerabilità ed eventi sismici è identificata nel lavoro di Cafiso e Altri [12] dove la vulnerabilità di un tronco stradale è data dalla combinazione tra vulnerabilità strutturale dei componenti ( $V_s$ ), e vulnerabilità funzionale ( $V_f$ ). In particolare, per la determinazione della vulnerabilità strutturale, sono realizzate schede di valutazione per ponti e viadotti, rilevati, trincee e gallerie, sulla base degli elementi più importanti che sono coinvolti nel fenomeno, e in base a queste, viene espresso un giudizio di vulnerabilità. La vulnerabilità funzionale, invece, dipende dalle possibili alternative al tronco stradale individuabili nella rete, e dalle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura stradale. Sulla base di tali assunzioni la vulnerabilità globale di un tronco stradale sarà data da:

$$V_g = V_s \times (G \times R_e)$$

**Eq. 18**

dove:

- $V_g$  è la vulnerabilità globale del tronco stradale;
- $V_s$  è la vulnerabilità strutturale determinata in base a check-list;
- $G$  sono le caratteristiche geometriche;
- $R_e$  è una misura dei percorsi alternativi al tronco considerato.

Approfondimenti sulle check-list specificamente studiate per il rischio sismico possono essere trovati sempre nei lavori di Cafiso e altri [13] [14]. L'infrastruttura viaria viene considerata come un sistema complesso dato dall'unione di più

componenti, ciascuno con le proprie caratteristiche di vulnerabilità. Componenti di una infrastruttura viaria sono i rilevati, le trincee, i ponti, i viadotti e le gallerie, vengono considerati inoltre come componenti tutte quelle opere aggiuntive indispensabili per la stabilità e il buon funzionamento dell'infrastruttura (opere di contenimento, di drenaggio etc). Per ciascuno di questi componenti vengono individuati gli elementi determinanti per la valutazione della vulnerabilità. Tra tali elementi determinanti ve ne sono di alcuni comuni a tutti i componenti, come la tipologia costruttiva, l'età, lo stato di manutenzione, i materiali utilizzati, etc. In base alle caratteristiche dei componenti viene infine effettuato il giudizio di vulnerabilità, attribuendo in maniera schematica classi di vulnerabilità per ogni elemento.

Altri autori [61] utilizzano metodologie simili per stabilire classi di vulnerabilità sismica sempre per viadotti, gallerie rilevati e trincee. Nel caso specifico di rilevati e di trincee viene considerato come fattore discriminante l'altezza, ritenendo che, con l'aumentare della stessa, aumenti la probabilità di interruzione totale della carreggiata per cedimenti del solido stradale. Ulteriori parametri di valutazione vengono poi fissati in relazione alla presenza di muri di contenimento ed alle caratteristiche dei piani di posa dei rilevati e dei terreni attraversati dalle trincee, mentre per i viadotti e le gallerie, qualunque sia la tipologia strutturale, viene assegnata una vulnerabilità elevata, poiché ritenuti punti critici del sistema viario. Nel lavoro sopracitato la modalità con la quale vengono assegnati i valori, la vulnerabilità dei singoli elementi prescinde da fattori di analisi strutturale, rimanendo connessa a grandezze facilmente ricavabili (altezze, numero delle luci, lunghezza delle luci, limiti di peso, stato manutentivo, etc.).

Per la formulazione di un giudizio quantitativo sulla vulnerabilità strutturale è necessario scendere a un livello di analisi più dettagliato. In letteratura, ad esempio esistono diverse metodologie per la valutazione della vulnerabilità sismica dei ponti, o di opere idrauliche. In questo caso si fa riferimento spesso e volentieri a discipline specifiche dell'analisi strutturale, o dell'idraulica.

Un esempio di valutazione della vulnerabilità strutturale di ponti e viadotti si può trovare nel lavoro di Cafiso e altri [13] [14] infatti, per questa tipologia di componente dell'infrastruttura stradale, esistono nella letteratura specialistica modelli per la valutazione del danno e quindi della vulnerabilità. Si è infatti visto che al concetto di vulnerabilità può essere associato quello di danno, infatti il danno subito

da un'infrastruttura può rappresentare ex post la sua vulnerabilità. Per consentire una valutazione di vulnerabilità si ricorre a una serie di indici capaci di individuare un certo numero di “stati” di funzionalità: si va dalla funzionalità completa alla funzionalità diminuita, fino ad arrivare al collasso.

Per arrivare a definire il valore della vulnerabilità occorrerà quindi stabilire una corrispondenza biunivoca tra pericolosità e danno, ovvero individuare la cosiddetta curva di vulnerabilità:

$$D = V(P)$$

Eq. 19

Nel citato studio [13] [14] vengono illustrate le metodologie per la definizione delle curve di vulnerabilità, le quali possono essere sostanzialmente ricondotte a due categorie:

1. quantificare i danni analiticamente, schematizzando la risposta strutturale allo stato tensionale e deformativo corrispondente, ovvero valutare i danni al variare della forza specifica. Ad esempio, in caso di evento sismico la misura dell'azione è espressa dal PGA, il valore massimo dell'accelerazione al suolo;
2. quantificare il danno identificando nella struttura un numero di **indicatori di vulnerabilità** determinati in base a caratteristiche tipologiche costitutive e strutturali dell'infrastruttura stessa.

I metodi della categoria 1 sono preferibilmente applicabili nel caso si valuti un'unica infrastruttura, quelli della categoria 2 meglio si adattano allo studio, anche statistico, di più infrastrutture, sono quindi preferibili per le analisi di una rete stradale.

A sua volta la categoria 2 è suddivisibile in ulteriori 2 sottocategorie (2a e 2b). Nella sottocategoria 2a ogni infrastruttura viene collocata in una classe di vulnerabilità. Tali classi sono costruite in base ad indicatori tipologici (materiali, età di costruzione, tipologia costruttiva, etc) e a ciascuna di queste viene assegnata una curva di vulnerabilità o una matrice di probabilità di danno. Nella categoria 2b a ogni struttura viene attribuito un indice di vulnerabilità in base ad indicatori interpretati come i sintomi di un' idoneità a sopportare i terremoti. L'indice in questo caso è calcolato in funzione di indici parziali corrispondenti a ciascun indicatore. Il metodo

utilizzato dagli Autori per la valutazione della vulnerabilità dei ponti rientra all'interno della sottocategoria 2b.

In una prima fase vengono individuati una serie di parametri relativi a ponti e viadotti, come l'anno di costruzione, le caratteristiche della sovrastruttura, l'allineamento dei supporti, ecc. Ad ogni parametro viene poi associato un peso, dedotto dalla bibliografia specifica. Infine per ogni parametro viene calcolato un indice di danno, dato dall'applicazione della formula seguente:

$$Y = X_i \times \sum_{i=1}^N \beta_i \times X_i$$

Eq. 20

dove:

- $Y_i$  è l'indicatore di danno, compreso tra 0 e 4;
- $X_i$  è il valore associato alla classe di appartenenza del parametro  $i$ ;
- $\beta_i$  è il peso attribuito al parametro  $i$ .

Un esempio di valutazione della vulnerabilità delle opere idrauliche a difesa del corpo stradale è presentato nei lavori di Bosurgi e al. [10] [11]. In particolare in questo caso il problema viene analizzato utilizzando un approccio di tipo sistemico, e individuando i componenti vulnerabili e i parametri da cui sono influenzati. Nella metodologia proposta dagli Autori, applicata anche a un caso reale, le opere idrauliche a difesa del solido stradale sono rappresentate come un sistema di componenti collegati tra loro in serie e/o in parallelo. Di questi sistemi è possibile calcolarne l'affidabilità o l'inaffidabilità. È inoltre possibile valutare l'importanza di quei componenti che risultano cruciali per il buon funzionamento del sistema, mediante misure di importanza presenti in letteratura (misura di importanza di Birnbaum, misura di importanza di Fussell-Vesely, misura di importanza critica di Gandini). Calcolando tali misure per tutti i componenti facenti parte del sistema e confrontando i risultati si può arrivare alla determinazione di quel componente che risulta maggiormente importante all'interno del sistema, ciò in qualche modo conduce anche a una valutazione della vulnerabilità di ogni componente.

ELEMENTO ANALIZZATO	MISURA DI VULNERABILITÀ		FONTE	MODALITÀ DI STUDIO
Arco della rete stradale	$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} v_{ijrs}$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_{ijrs}</math> = differenza del costo generalizzato di trasporto, dal nodo <math>i</math> al nodo <math>j</math> quando il collegamento <math>rs</math> non è più funzionante;</li> <li><math>d_{ij}</math> = spostamenti tra <math>i</math> e <math>j</math>.</li> <li><math>v_{ijrs} = s[ij, G(N, E)] - s[ij, G(N, E - e_{rs})]</math></li> </ul>	Taylor ed al. [59]	ANALISI QUANTITATIVE
Arco della rete stradale	$\text{Importance}_{\text{net}}(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}}, k \in E^{nc}$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>k</math> = l'arco di cui si sta valutando l'importanza;</li> <li><math>w_{ij}</math> = pesi per valutare l'importanza dei singoli nodi all'interno della rete;</li> <li><math>c_{ijk}</math> = costo di trasporto da in nodo <math>i</math> a un nodo <math>j</math> nel caso di un elemento <math>k</math> interrotto</li> <li><math>c_{ij0}</math> = il costo di trasporto da in nodo <math>i</math> a un nodo <math>j</math> nella situazione iniziale di perfetto funzionamento della rete.</li> </ul>	Jenelius e altri [35] [36]	
Comunità di una regione	$\text{Exposure}_{\text{max}}(m) = \max_{k \in E^{nc}} \frac{\sum_{i \in V_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_{i \in V_m^d} \sum_{j \neq i} w_{ij}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>k</math> = l'arco di cui si sta valutando l'importanza;</li> <li><math>w_{ij}</math> = pesi per valutare l'importanza dei singoli nodi all'interno della rete;</li> <li><math>c_{ij}^k</math> = costo di trasporto da in nodo <math>i</math> a un nodo <math>j</math> nel caso di un elemento <math>k</math> interrotto</li> <li><math>c_{ij}^0</math> = il costo di trasporto da in nodo <math>i</math> a un nodo <math>j</math> nella situazione iniziale di perfetto funzionamento della rete.</li> </ul>	Jenelius e altri [35] [36]	
Unità spaziale di una regione	$D_{s,t} = \frac{f - R_{s,t}}{f - 1}$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>D_{s,t}</math> = misura delle prestazioni della rete in termini di accessibilità;</li> <li><math>s</math> = l'unità spaziale su cui viene misurata la differenza di accessibilità;</li> <li><math>f</math> = costante;</li> <li><math>R_{s,t} = \frac{1}{n_s} \sum_{i \in N_s} R_{i,t},</math></li> <li><math>R_{i,t} = \left[ \sum_{j \neq i} w_{ij} d_{ij} \right] \left[ \sum_{j \neq i} w_{ij} d_{ij}^* \right]^{-1}</math></li> <li><math>d_{ij}^*</math> = distanza minima tra i nodi in caso di rete funzionante;</li> <li><math>d_{ij}</math> = distanza minima tra i nodi <math>i</math> e <math>j</math> in caso di rete non funzionante a</li> </ul>	Chang [17] [18]	

ELEMENTO ANALIZZATO	MISURA DI VULNERABILITÀ		FONTE	MODALITÀ DI STUDIO
		<p>seguito dell'evento;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>w_{ij}</math> = pesi attribuiti ai nodi.</li> </ul>		
Arco della rete	$A^j = \sum_{i=1}^{24} A_i - \sum_{i=1}^{24} A_i^j = \sum_{i=1}^{24} (A_i - A_i^j)$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>A^j</math> = indice di accessibilità (vulnerabilità) dell'arco <math>j</math> quando questo è distrutto;</li> <li> <math display="block">A_i = 4 \times \left[ \alpha \frac{P_i}{\sum_{K=1}^{24} P_k} \sum_{j=1}^{23} \left( \frac{P_j}{\sum_{k=1}^{24} P_k} \frac{d_{ij}^{-\beta}}{\sum_{K=1}^{24} d_{ik}^{-\beta}} \right) + (1 - \alpha) \frac{P_i}{\sum_{K=1}^{24} P_k} \sum_{j=1}^{23} \left( \frac{P_j}{\sum_{k=1}^{24} P_k} \frac{t_{ij}}{\sum_{K=1}^{24} t_{ik}} \right) \right]</math> </li> <li><math>A_i^j</math> = l'indice di accessibilità della contea <math>i</math> calcolato mediante l'eq. 14 in caso di distruzione del collegamento <math>j</math>.</li> <li><math>\alpha</math> = scalare utilizzato come peso (compreso tra 0 e 1);</li> <li><math>p_{i(j)}</math> = popolazione residente nella contea <math>i</math>;</li> <li><math>d_{ij}</math> = distanza minima tra la contea <math>i</math> e <math>j</math> a seguito di un determinato scenario;</li> <li><math>d_{ij}^*</math> = distanza minima iniziale tra <math>i</math> e <math>j</math>;</li> <li><math>\beta = 0,44</math> ed è ottenuto empiricamente;</li> <li> <math>t_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^n AADT_m d_m}{d_{ij}}</math> è il traffico medio tra <math>i</math> e <math>j</math> misurato lungo il cammino minimo;</li> <li><math>AADT_m</math> = traffico giornaliero medio calcolato lungo il link <math>m</math>;</li> <li><math>d_m</math> = lunghezza del link <math>m</math>.</li> </ul>	Sohn [56]	
Tronco stradale urbano	$Idc = \min[L - (Ide1 \times H1 + Ide2 \times H2)]$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>Ide1</math> e <math>Ide2</math> = indici di danno per l'edificio 1 e 2</li> <li><math>L</math> è la larghezza utile della strada;</li> <li><math>H1</math> e <math>H2</math> = altezza massime di due edifici affacciati adiacenti al tronco.</li> </ul>	Cafiso e al. [14]	
Ponti o viadotti	$Y = X_i \times \sum_{i=1}^N \beta_i \times X_i$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>Y_i</math> è l'indicatore di danno, compreso tra 0 e 4;</li> <li><math>X_i</math> è il valore associato alla classe di appartenenza del parametro <math>i</math>;</li> <li><math>\beta_i</math> è il peso attribuito al parametro <math>i</math>.</li> </ul>	Cafiso e al. [13] [14]	



<b>ELEMENTO ANALIZZATO</b>	<b>MISURA DI VULNERABILITÀ</b>	<b>FONTE</b>	<b>MODALITÀ DI STUDIO</b>
Opere idrauliche stradali	<i>Le opere idrauliche a difesa del solido stradale sono rappresentate come un sistema di componenti collegati tra loro in serie e/o in parallelo. Viene valutata l'importanza dei componenti che risultano cruciali per il buon funzionamento del sistema, mediante la misura di importanza di Birnbaum, la misura di importanza di Fussell-Vesely e la misura di importanza critica di Gandini.</i>	Bosurgi e al. [10] [11]	
Vulnerabilità dei tronchi stradali	<i>L'infrastruttura viaria viene considerata come un sistema complesso dato dall'unione di più componenti (rilevati, trincee, ponti e viadotti, gallerie, ciascuno con le proprie caratteristiche di vulnerabilità. Per ciascuno di questi componenti vengono individuati gli elementi determinanti per la valutazione della vulnerabilità. In base alle caratteristiche dei componenti viene infine effettuato il giudizio di vulnerabilità, attribuendo in maniera schematica classi di vulnerabilità per ogni elemento.</i>	Cafiso e alt. [13] [14]	<b>ANALISI QUALITATIVE</b>
Rilevati e trincee	<i>Nel caso specifico di rilevati e di trincee viene considerato come fattore discriminante l'altezza, ritenendo che, con l'aumentare della stessa, aumenti la probabilità di interruzione totale della carreggiata per cedimenti del solido stradale. Ulteriori parametri di valutazione vengono poi fissati in relazione alla presenza di muri di contenimento ed alle caratteristiche dei piani di posa dei rilevati e dei terreni attraversati dalle trincee, mentre per i viadotti e le gallerie, qualunque sia la tipologia strutturale, viene assegnata una vulnerabilità elevata, poiché ritenuti punti critici del sistema viario.</i>	Tesorier e al., [61]	

### **2.3. SPUNTI PER LA RICERCA**

Quanto sopra esposto, riguardo le tipologie di vulnerabilità e le metodologie per valutarla, non esauriscono l'argomento relativo alla vulnerabilità stessa, ne tanto meno quello ancora più vasto relativo alla protezione civile. Infatti, affrontare il tema della protezione civile, ma affrontare lo stesso tema più specifico della vulnerabilità, significa in qualche modo affacciarsi in un universo di possibilità offerto alla ricerca; questo in qualche modo può essere considerato un aspetto positivo, per la libertà che viene offerta al ricercatore che si accinge allo studio, ma può anche considerarsi in qualche modo una difficoltà, sia per la vastità degli argomenti trattati, sia perchè in realtà si tratta di un campo che solo di recente è stato sviluppato. Per esempio, se può essere trovato un numero abbastanza ampio di studi concernenti la vulnerabilità delle singole strutture, così non si può dire dello studio della vulnerabilità a scala più vasta di sistemi a rete e sistemi territoriali. L'interesse verso questi studi si è infatti sviluppato solo a partire dagli anni 90 a seguito di eventi disastrosi come il terremoto di Kobe, in Giappone (1995), e oggi risulta di notevole interesse, non solo per i rischi di origine naturale, la cui entità e frequenza è in crescita, ma anche per i rischi di origine antropica (basti pensare agli attacchi terroristici). La difficoltà ancora sta nella presenza di approcci a volte molto differenti tra di loro, solo alcuni sono stati sopramenzionati, e si è tenuto a mettere in evidenza studi aventi una certa comunanza di obiettivi e metodologie (analisi della vulnerabilità con riferimento all'accessibilità).

In questo universo di studi e metodologie è opinione personale ritenere che se un taglio deve essere offerto alla ricerca, quello che risulta di maggiore interesse è di offrire metodologie realmente applicabili e efficaci in termini di aiuto e miglioramento alle attività svolte dalla protezione civile. L'argomento affrontato, com'è chiaro, non risulta affatto esaurito, e alcuni spunti per ulteriori approfondimenti giungono anch'essi dall'analisi bibliografica.

Ad esempio nel lavoro di Berdica [7] si suggeriscono tre possibili filoni di ricerca e approfondimento:

- sviluppare modelli capaci di effettuare studi sull'affidabilità;
- studiare sistemi di gestione del traffico capaci di garantire alti livelli di prestazione;

- realizzare nuove procedure per valutare e ottimizzare la pianificazione, la costruzione e la gestione delle reti stradali, che considerino il concetto di affidabilità e vulnerabilità al loro interno.

Husdal [32] [34], a cui si devono tre delle definizioni di vulnerabilità sopra esposte (vulnerabilità strutturale, naturale, e legata al traffico), sottolinea come, sebbene un tronco stradale possa essere soggetto a una sola di queste tipologie di vulnerabilità, la rete sarà globalmente esposta alla somma complessiva di queste tre, che inoltre, interagendo le une con le altre, tendono a incrementare il loro effetto. Per questa ragione suggerisce di indirizzare la ricerca verso una metodologia che possibilmente consideri la somma di queste tre tipologie di vulnerabilità. Infatti, alcuni collegamenti di una rete stradale possono avere delle deficienze strutturali, altri saranno particolarmente esposti ad eventi naturali, e altri ancora possono essere particolarmente vulnerabili nei confronti degli incrementi di traffico dovuti ad esempio ad un incidente. Per questa ragione lo studio della vulnerabilità dovrebbe considerare ciascun attributo separatamente e allo stesso tempo insieme agli altri.

Ancora altri spunti di approfondimento vengono da considerazioni personali. Dall'analisi bibliografica quello che risulta assente è una metodologia che cerchi di inglobare le diverse scale di analisi insieme, e che non si fermi semplicemente allo studio di una rete, ma che arrivi anche ad un livello di dettaglio maggiore. Infatti, gli studi sull'affidabilità e sulla stessa accessibilità esposti sopra, in realtà spesso non considerano le caratteristiche strutturali dell'infrastruttura per determinarne la vulnerabilità. Detto in altre parole, un collegamento potrebbe risultare vulnerabile perchè la sua chiusura sarebbe capace di avere un impatto maggiore sulla popolazione residente o sulla gestione dei soccorsi, ma in realtà un collegamento a "impatto inferiore" potrebbe essere ugualmente vulnerabile perchè ad esempio, le caratteristiche progettuali e costruttive con cui è stato realizzato lo rendono propenso a collassare in caso di particolari eventi.

Altra considerazione personale riguarda le tipologie di rischio analizzate nei diversi studi: sia per quanto attiene la vulnerabilità strutturale che la vulnerabilità di una rete stradale, i casi maggiormente studiati risultano quelli relativi al rischio sismico. Una documentazione sicuramente inferiore è stata infatti reperita per il rischio idrogeologico. Questa lacuna può essere in parte causata dal fatto che gli eventi sismici sono rischi a maggiore impatto sia sul territorio che sulle reti di

trasporto, sono inoltre quelli che potenzialmente potrebbero causare danni maggiori, anche in termini di perdita di vite umane, inoltre sono anche quelli di cui si dispone, con ogni probabilità, di una documentazione maggiore. Per cui, uno spunto per la ricerca potrebbe essere quello di andare ad analizzare tipologie di rischio non ancora studiate in maniera approfondita, come ad esempio il rischio idrogeologico. In realtà questa tipologia di rischio può anch'essa causare gravi ripercussioni sul territorio, sia in termini di riduzione di accessibilità dovuta alla perdita di alcuni collegamenti, sia in termini di danni economici; inoltre da anni si assiste a una crescita di tale tipologia di eventi, sia in termini di probabilità di accadimento che in termini di magnitudo. Oltre tutto il rischio idrogeologico è senza dubbio il più diffuso nell'ambito del territorio nazionale italiano. D'altra parte, le difficoltà nell'indirizzare la ricerca verso questa direzione derivano sia dalla complessità degli elementi da analizzare, sia dalla scarsità di dati su eventi che si sono verificati in passato.

Quanto sopra esposto non rappresenta che una breve e sintetica descrizione delle metodologie più diffusamente utilizzate per lo studio della vulnerabilità. Com'è chiaro queste ultime variano notevolmente a secondo della scala di analisi, che si tratti ad esempio di una rete di trasporto (studio dell'accessibilità, della connettività, della capacità, della probabilità di collasso etc) o di un tronco stradale specifico (utilizzo delle check list) o ancora di un manufatto o un' opera d'arte (vulnerabilità dei ponti, delle opere idrauliche, etc.).

### **3. STUDIO DELLA VULNERABILITA' DI UNA INFRASTRUTTURA STRADALE AL RISCHIO IDROGEOLOGICO.**

#### **3.1. INTRODUZIONE ALLA METODOLOGIA: IL CONCETTO DI VULNERABILITÀ.**

La metodologia è stata studiata in riferimento a un genere di rischio specifico: il rischio idrogeologico. Tuttavia si ritiene che essa possa senza dubbio essere applicata ad altri tipi di rischio. Il risultato ultimo del modello proposto è una quantificazione di un indice di vulnerabilità che caratterizza un arco stradale. Si è visto come la definizione di vulnerabilità possa essere suscettibile di diverse interpretazioni. Per fare alcuni esempi D'Este e Taylor [53] separano nettamente il concetto di vulnerabilità da quello di affidabilità; infatti, la loro definizione di vulnerabilità risulta maggiormente concentrata sulle conseguenze date da un evento disastroso, l'affidabilità invece risulta un concetto connesso alla probabilità di collasso di un elemento. Una posizione simile si trova nei lavori di Husdal [33] [34], e anche Cafiso e altri [13] [14] tengono comunque separati il concetto di vulnerabilità da quello di pericolosità, ovvero dalla probabilità che un evento si verifichi.

Per questa ragione negli studi condotti da questi Autori, la rete stradale viene analizzata a prescindere dalla probabilità che essa ha di essere colpita da un evento critico, ma la si considera nella sua interezza. Un approccio simile si ritrova anche in Jenelius e altri [35] [36] anche in questo caso si analizza la rete stradale nella sua interezza, a prescindere dal livello di rischio e della tipologia di rischio a cui può essere esposta. Tuttavia gli Autori [36] dividono il concetto di vulnerabilità in due parti, la prima direttamente connessa alla probabilità che un evento pericoloso si verifichi, e la seconda, chiamata “esposizione”, legata invece alle conseguenze causate da un dato evento in un dato territorio.

Partendo da queste considerazioni il concetto di vulnerabilità utilizzato in questo lavoro può essere associato a quello di criticità di un arco stradale. Quindi per vulnerabilità di un arco si intende la sua criticità, data dalla somma di due fattori, la debolezza e l'importanza.

$$VULNERABILITÀ = CRITICITÀ = DEBOLEZZA + IMPORTANZA$$

La **debolezza** di un elemento è connessa alla probabilità che questo ha di subire danni o collassare a seguito di un evento critico, in questo senso nel lavoro presentato non si opera una netta distinzione tra probabilità di un evento e conseguenze. D'altra parte uno degli obiettivi posti alla base della ricerca è stato quello di offrire una metodologia direttamente implementabile nei piani di emergenza della Protezione Civile, e per questa ragione non si poteva prescindere dalla pericolosità insistente sulla strada. Per cui un arco stradale verrà considerato debole quando ricade in un'area ad alta pericolosità (nel caso specifico in esame pericolosità idrogeologica).

Per quanto attiene **l'importanza** si fa riferimento alle conseguenze date dalla chiusura di un arco stradale valutate nel territorio di riferimento. Per conseguenze si intende l'incremento dei tempi di percorrenza tra un centro abitato e l'altro. In questo senso appare chiaro che l'importanza di un arco è connessa sia alla topologia di una rete, ovvero al grado di connessione dell'arco, che alla possibilità che esso ha di essere sostituito da percorsi alternativi. Inoltre, le conseguenze in termini di aumento dei tempi di percorrenza, per come è stato impostato il lavoro di tesi, risultano legate anche alle caratteristiche intrinseche dell'arco in esame e degli altri archi con i quali è connesso, dove per caratteristiche intrinseche si intendono quelle progettuali ma anche le caratteristiche geometriche e costruttive.

Per quest'ultima ragione il concetto di vulnerabilità utilizzato, in qualche modo può essere avvicinato al concetto di vulnerabilità diretta [13] e di vulnerabilità strutturale [32], viste in precedenza, ma rappresenta anche una misura di vulnerabilità funzionale, perchè valuta le conseguenze dovute alla mancata funzionalità di un arco che costituisce la rete.

Riassumendo, nel modello proposto la vulnerabilità degli archi viene valutata sugli archi stradali esposti a rischio e tenendo conto delle seguenti variabili:

- caratteristiche geometriche e planimetriche della strada;
- importanza dell'arco all'interno di una regione valutata in termini di incremento dei tempi di percorrenza in caso di chiusura dell'arco.

Questi aspetti in realtà rispecchiano le tre tipologie di vulnerabilità introdotte da Husdal [32]. Infatti calcolare la vulnerabilità di archi stradali esposti al rischio idrogeologico in qualche modo valuta una vulnerabilità di tipo naturale, le

caratteristiche geometriche di un' infrastruttura si riferiscono invece alla vulnerabilità strutturale, mentre ancora l'importanza in termini di incremento dei tempi di percorrenza valuta una vulnerabilità a livello di rete stradale.

### **3.2. APPROCCIO ANALITICO PROPOSTO**

Il grafico 1 rappresenta l'approccio seguito per il calcolo e l'attribuzione degli indici di vulnerabilità per gli archi stradali di una rete. Per arco stradale nel presente lavoro si intende un tratto stradale compreso tra due intersezioni, e privo di intersezioni interne.

La metodologia proposta si sviluppa secondo i seguenti punti:

- studio del territorio e della pericolosità al rischio idrogeologico insistente sullo stesso;
- analisi della rete stradale;
- identificazione degli archi deboli all'interno della rete;
- calcolo degli indici di vulnerabilità per gli archi deboli;
- realizzazione di una mappa della vulnerabilità della rete stradale.

Il primo passo è rappresentato dalla realizzazione di analisi territoriali e analisi di rete.

Lo svolgimento delle analisi territoriali necessita di un approccio di tipo multidisciplinare. Nelle analisi territoriali andranno identificati innanzitutto i nodi di riferimento, ovvero i centri abitati all'interno di un territorio; tra questi andrà quindi operata una distinzione, tra centri origine dei soccorsi (dove risultano localizzate le strutture e i mezzi di soccorso: ospedali, caserme dei vigili del fuoco, caserme delle forze dell'ordine, strutture della protezione civile, etc) e centri considerati come destinazione dei soccorsi. In questo senso per l'identificazione dei centri di soccorso potrebbe essere utile l'analisi di un piano di protezione civile, dove già esistente, all'interno del quale risultano definiti i ruoli, le operazioni, e i mezzi da utilizzare durante un'emergenza.

Le analisi territoriali consistono anche nell'approfondimento dei rischi che insistono sul territorio, in questa fase risulta fondamentale potersi interfacciare con

specialisti del settore, in particolare potranno essere utilizzate carte del rischio, ove già presenti, o svolgere analisi di dettaglio più specifiche, ove lo si ritenga necessario. A titolo di esempio i Piani di Assetto Idrogeologico offrono una mappatura del territorio distinguendo lo stesso in aree a pericolosità crescente (H1, H2, H3, H4), tuttavia la localizzazione delle aree pericolose, in accordo con quanto prescritto all'interno del D.P.C.M. del 29/10/1998, è basata su metodi speditivi che hanno come criterio generale la localizzazione di eventi franosi o alluvionali avvenuti in passato, la stessa perimetrazione delle aree pericolose può essere realizzata mediante metodi speditivi. Tutto ciò, seppur non inficia la validità dei suddetti Piani, tuttavia non rende improbabile che un evento franoso e di piena possa verificarsi in aree ritenute non pericolose. Per questa ragione, per poter identificare gli archi deboli di una rete stradale potrebbe essere necessaria un'analisi approfondita mediante la verifica di ogni singolo arco, utilizzando ad esempio delle check list, o mediante controlli più approfonditi. Laddove questo non fosse possibile a causa di limiti temporali o finanziari, possono essere utilizzate carte di rischio frane o rischio piene già esistenti.

Un esempio di check list utilizzabili per la valutazione della vulnerabilità idrogeologica di tronchi stradali viene presentato in appendice. Tali check list permettono l'attribuzione di un giudizio qualitativo di vulnerabilità (alto o basso) a tronchi stradali localizzati in trincea o in rilevato. Tali check list potrebbero essere utilizzate in due momenti:

- nella fase iniziale di analisi della rete per l'individuazione speditiva dei tronchi deboli, in aggiunta e integrazione agli studi specifici del settore;
- nella fase finale, una volta che sono stati individuati gli archi vulnerabili, per approfondire ulteriormente le analisi e offrire un giudizio qualitativo anche di vulnerabilità strutturale del tronco stradale.



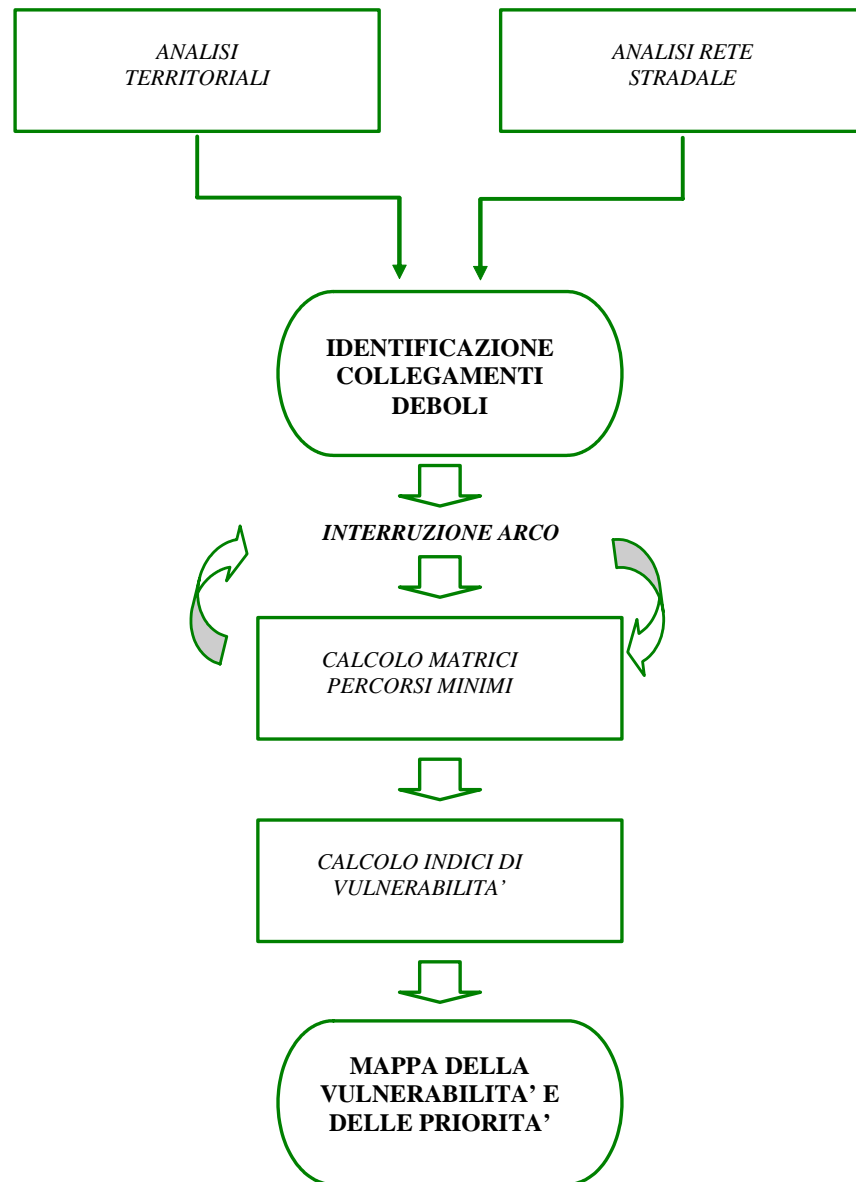


Grafico 1 Approccio analitico proposto

Il passo immediatamente successivo all'analisi territoriale è l'analisi della rete stradale di riferimento della regione. Sarà quindi necessario rappresentare il sistema infrastrutturale attraverso una mappa viaria in cui sia possibile distinguere tra nodi e tronchi stradali (archi), dei quali devono essere note e definite in maniera univoca le coordinate geografiche e quindi la posizione nello spazio. Una volta costruita la rete stradale può essere necessario procedere alla classificazione funzionale della stessa, e alla distinzione tra viabilità principale e viabilità minore, inoltre devono essere individuate le strade e i percorsi che possono essere utilizzati dai soccorsi o che possono rappresentare vie di fuga, si dovrà verificare a quali archi e a quali infrastrutture possono essere attribuite caratteristiche di "lifelines" in base alle caratteristiche

geometriche e progettuali (sezione trasversale sufficiente per permettere il passaggio dei mezzi di soccorso, pendenze e tortuosità non eccessive, etc). All'interno della rete così analizzata andranno escluse, per il calcolo dell'indice di vulnerabilità, tutte quelle infrastrutture che, a causa delle loro caratteristiche non possono svolgere funzioni di lifelines.

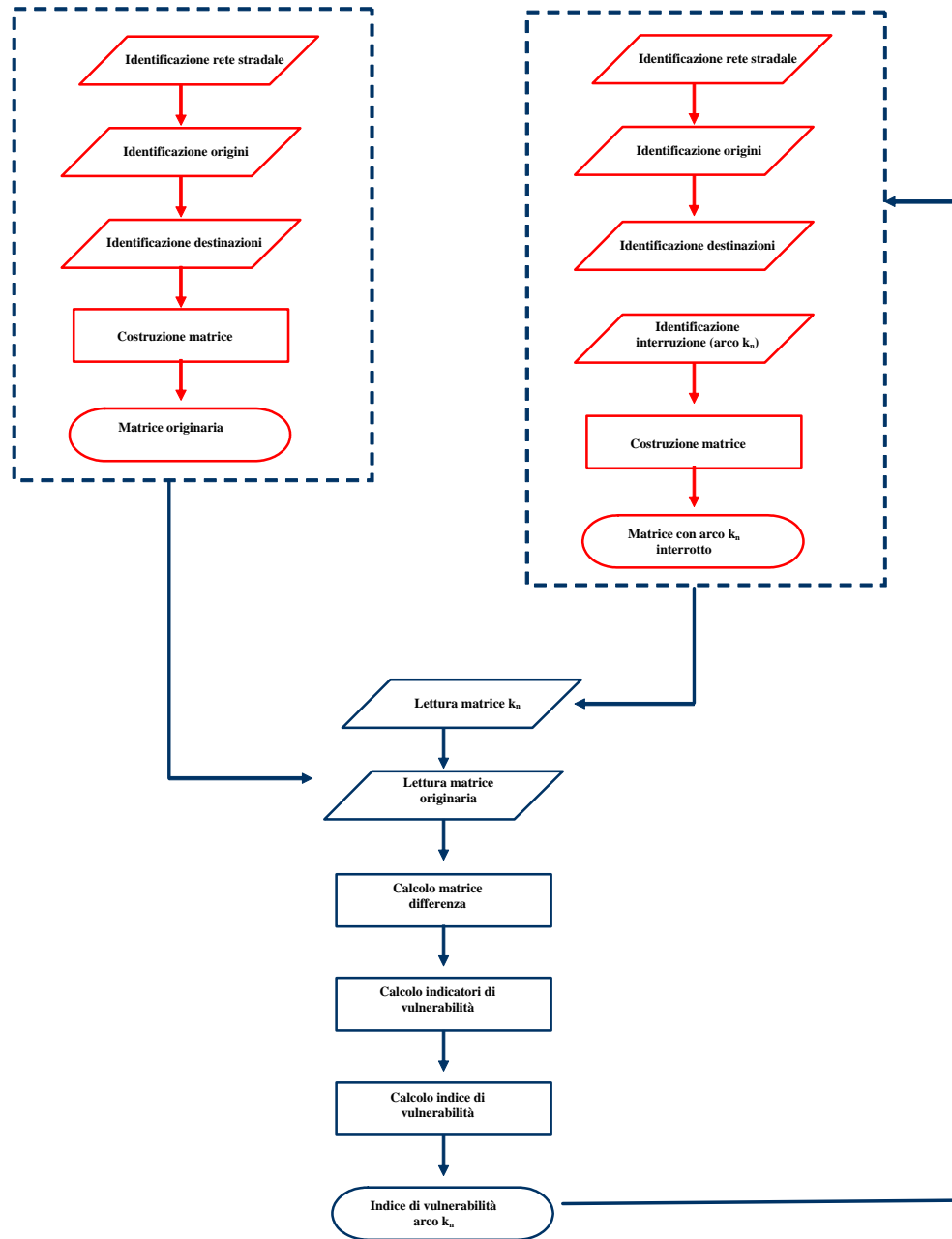
Dalla sovrapposizione tra la rete stradale di riferimento e le aree ad alta pericolosità (nel caso specifico pericolosità idrogeologica) si identificano, all'interno della rete, gli archi che possono considerarsi deboli, dove per debolezza si intende un'alta probabilità di accadimento dell'evento che potrebbe portare alla chiusura dell'arco stesso.

Una volta costruita la rete di riferimento e individuati gli archi deboli, mediante un procedimento iterativo viene calcolato l'incremento dei tempi di percorrenza causati dalla chiusura di ogni singolo arco. È possibile riassumere il procedimento mediante i seguenti passi:

1. si costruisce la matrice dei tempi di percorrenza in base ai camini minimi per tutti i centri della regione quando la rete è perfettamente funzionante (utilizzando un algoritmo che permetta di calcolare i percorsi minimi e i relativi tempi di percorrenza);
2. si interrompe un arco debole;
3. si riapplica l'algoritmo per il calcolo dei percorsi minimi ottenendo la matrice dei tempi di percorrenza quando l'arco è interrotto;
4. si calcolano per l'arco debole gli indici di vulnerabilità considerati;
5. si ripetono i passi da 2 a 4 per tutti gli altri archi deboli della rete.

Nel grafico 2 è schematizzato il procedimento iterativo descritto nei punti precedenti.

Il risultato dell'analisi sarà quindi una rete stradale dove ogni arco debole sarà caratterizzato da un valore dell'indice di vulnerabilità, quest'ultimo può essere anche letto come un indice di priorità o importanza per la realizzazione di interventi.



**Grafico 2** Procedimento di calcolo iterativo per l'indice di vulnerabilità degli archi

Gli argomenti da approfondire nell'ottica dell'approccio suddetto sono:

- identificazione di un indice di vulnerabilità;
- scelta dell'algoritmo e dello strumento per la ricerca dei percorsi minimi;
- modalità di attribuzione dei tempi e delle velocità di percorrenza a ciascun arco della rete

### **3.2.1. LE MISURE DI VULNERABILITÀ PROPOSTE**

Le misure proposte per la valutazione della vulnerabilità degli archi stradali sono state studiate per rispondere agli obiettivi posti alla base della ricerca, ovvero:

- realizzare strumenti ad implementazione dei piani di protezione civile;
- offrire indici per la valutazione delle priorità degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria sulle strade;
- offrire strumenti per la gestione informata del rischio da parte degli Enti proprietari e gestori;
- valutare gli impatti su scala regionale dati dalla chiusura di un collegamento stradale.

Le misure di vulnerabilità viste nei paragrafi precedenti non rispondono del tutto agli obiettivi suddetti. Infatti nell'approccio utilizzato da Taylor [59], ma anche da Jenelius [35] [36] la base per le valutazioni è data dall'incremento dei tempi di percorrenza in seguito alla chiusura di un arco specifico, eppure le formule utilizzate (vedi formula 4 e formula 7) pesano il valore dell'indice in base rispettivamente agli spostamenti e ai flussi di traffico. Un approccio di questo tipo opera quindi una distinzione secondo una prospettiva basata sull'efficienza sociale: gli archi e le strade più utilizzate, che servono una popolazione più numerosa, generano crescita economica e posseggono conseguentemente un'importanza maggiore. Inoltre, sia l'approccio di Taylor che quello di Jenelius non operano nessuna distinzione tra percorsi che vengono utilizzati dai mezzi di soccorso e percorsi potenzialmente non utilizzati. Ciascuna origine e ciascuna destinazione rivestono quindi un'uguale importanza. Le valutazioni di importanza della rete vengono realizzate inoltre su tutta la rete, a prescindere dalla sua reale esposizione al rischio. I tempi attribuiti inoltre a ciascun arco secondo la formula di Jenelius (eq. 7) sono dati dal rapporto tra lunghezza dell'arco e velocità in condizioni di flusso libero (free flow speed) dedotta dalla "volume delay function". Anche nella valutazione dell'esposizione dei centri urbani (vedi eq. 10) viene utilizzato un approccio di questo tipo, in particolare come peso vengono assegnati gli spostamenti generati dal comune. Indici pesati di accessibilità interpretata come vulnerabilità sono anche quelli che si trovano nei lavori di Chang [17] [18] e Sohn [56]. Nel primo caso (eq. 13) l'Autrice non valuta l'importanza di un singolo arco, ma la diminuzione di accessibilità del comune, il peso anche in questo caso sono gli spostamenti generati dal comune. Secondo l'eq. 14 di Sohn [56] l'importanza dell'arco viene invece valutata in

termini di variazione di accessibilità dei comuni di riferimento, l'accessibilità del comune è determinata dall'incremento delle distanze e dal TGM, e valutata mediante un peso rappresentato dalla popolazione residente nel comune in esame.

L'approccio che, invece, si è voluto utilizzare nel lavoro di tesi è un approccio di tipo obbiettivo, ovvero tutte le strade e tutti gli archi stradali posseggono una importanza eguale e sono ugualmente significative, a prescindere da quanto siano realmente utilizzate. Un approccio di tale tipo sembra infatti meglio rispondere agli obiettivi suddetti; in una prospettiva di Protezione Civile tutte le destinazioni sono ugualmente importanti per prestare il soccorso, conseguentemente tutti gli archi che compongono il percorso minimo devono essere valutati in maniera uguale.

Si assume che l'evento critico sia dato da un evento di natura idrogeologica che porti alla chiusura totale dell'arco (ad esempio crollo di un ponte, cedimento di un opera d'arte, una frana che porti alla chiusura della carreggiata etc.). In conseguenza di ciò verranno modificati i camini minimi che collegano ciascuna origine a ciascuna destinazione del territorio preso in esame.

Si consideri  $N$  l'insieme dei nodi della rete stradale di riferimento,  $|N|$  il numero di nodi della rete. Sia  $N^c \subset N$  l'insieme dei nodi della rete dove sono localizzati i centri abitati, (comuni) considerati come origine e destinazione dei camini minimi, e sia  $|N^c|$  il numero di comuni.  $N^{cs} \subset N^c$  è invece l'insieme dei nodi (centri urbani) origine dei soccorsi, ovvero quei nodi della rete, dai quali, in caso di evento critico si dipartono i mezzi di soccorso.

Si consideri inoltre  $A$ , come l'insieme di archi della rete e  $|A|$  come il numero di archi della rete.  $A^d \subset A$  è l'insieme degli archi deboli della rete, ovvero l'insieme di archi dove la pericolosità, intesa come probabilità che un evento idrogeologico si verifichi è alta o molto alta, allora  $|A^d|$  è il numero di archi deboli della rete. Inoltre  $t_{ij}^0$  è il tempo di percorrenza considerato su un cammino minimo, tra un nodo  $i$  e un nodo  $j$ , quando tutta la rete non è danneggiata,  $t_{ij}^k$  è il tempo di percorrenza lungo il cammino minimo che collega il nodo  $i$  al nodo  $j$  quando l'arco  $k$  è interrotto.

Tutto ciò considerato, la base di partenza dalla quale sono dedotte le misure di accessibilità è data dalla formula seguente:

$$\Delta t_{ij}^k = (t_{ij}^k - t_{ij}^0)$$

Eq. 21

Dove:

- $\Delta t_{ij}^k$  è la differenza del tempo di percorrenza calcolato lungo il percorso minimo che collega il nodo  $i$  al nodo  $j$  quando l'arco  $k$  è interrotto;
- $i, j \in N^c$  sono i centri urbani della regione di riferimento;
- $k \in A^d$ ;

I tempi di percorrenza di ciascun arco sono assegnati allo stesso in base alle sue caratteristiche planimetriche, secondo le modalità che saranno in seguito esplicitate.

Considerando un arco  $k \in A^d$  la vulnerabilità di quest'ultimo può essere calcolata rispetto a un singolo comune o rispetto a una regione di riferimento. In particolare la **vulnerabilità rispetto a un comune** è data da:

$$\text{vulnerabilità}_i^k = \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)$$

Eq. 22

dove:

- $i \in N^c$  è un centro urbano di una regione di riferimento.

La **vulnerabilità dell'arco rispetto a una regione** di riferimento sarà invece data da:

$$\text{vulnerabilità}_{\text{regionale}}^k = \sum_i \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)$$

Eq. 23

Ogni arco debole che compone la rete presa in considerazione sarà quindi caratterizzato da un valore di vulnerabilità, che in particolare valuta le conseguenze date dalla sua chiusura per i centri urbani di una data regione. La vulnerabilità dell'arco così valutata è quindi una conseguenza dell'importanza dell'arco all'interno della rete, ma anche della possibilità che quell'arco ha di essere sostituito da percorsi alternativi. Infatti, se l'arco non possiede alternative valide di percorso è chiaro che i tempi di percorrenza, calcolati lungo i camini minimi, aumenteranno notevolmente.

Inoltre non tutti gli archi di una rete posseggono eguale importanza per quanto riguarda la gestione delle emergenze. Considerando l'origine dei soccorsi, dove sono allocate le strutture di emergenza (ospedali, caserme dei vigili del fuoco, mezzi di

soccorso) e le destinazioni (tutti gli altri centri all'interno di una regione), un arco della rete avrà una importanza (ovvero vulnerabilità) maggiore rispetto ai soccorsi se si trova lungo un cammino minimo utilizzato dai mezzi di soccorsi, ovvero lungo il minimo percorso che collega l'origine  $i$  dei soccorsi alla destinazione  $j$  degli stessi.

La **vulnerabilità dell'arco  $k$  rispetto ai soccorsi** sarà quindi data da:

$$\text{vulnerabilità}_{O/D \text{ socc}}^k = \sum_{i \in N^{cs}} \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)$$

Eq. 24

dove:

- $N^{cs}$  è l'insieme dei nodi considerati centri di soccorso;
- $i \in N^{cs}$  è un comune origine dei soccorsi;
- $j \in N$  è un centro urbano destinazioni dei soccorsi;

Per ogni arco  $k$  sarà inoltre valutabile il numero di percorsi minimi che lo caratterizzano. Date un origine  $i$  e una destinazione  $j$ ,  $\Delta t_{ij}^k > 0$  implica che l'arco  $k$  considerato appartiene al percorso minimo che collega il nodo  $i$  al nodo  $j$ . Maggiore è il numero di camini minimi interessati dalla chiusura dell'arco, maggiore sarà l'importanza e la centralità che l'arco riveste nei collegamenti di una regione. La **vulnerabilità** che tiene conto **dei camini minimi** caratterizzanti un arco  $k$  sarà quindi data dalla formula:

$$\text{vulnerabilità}_{\text{cam\_min}}^k = \sum_i \sum_j n_{ij}^k$$

Eq. 25

dove:

$$n_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{se } \Delta t_{ij}^k > 0, \\ 0 & \text{se } \Delta t_{ij}^k = 0, \end{cases}$$

Un evento che deve essere preso in considerazioni è la chiusura dell'arco più importante all'interno della rete. Occorrerà valutare quindi l'arco che determina il massimo valore dei tre indicatori di vulnerabilità precedentemente descritti (vulnerabilità regionale, vulnerabilità rispetto ai soccorsi e vulnerabilità che tiene conto dei camini minimi). Nel caso del primo indicatore tale valore sarà uguale a:

$$\text{vulnerabilità}_{\text{regionale}}^{\max} = \max_k \sum_i \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)$$

**Eq. 26**

dove:

-  $i, j \in N^c$ ;

-  $k \in A^d$ .

Analogamente il collegamento più importante per i percorsi tra origini dei soccorsi e destinazioni è dato dalla seguente:

$$\text{vulnerabilità}_{\text{O/D socc}}^{\max} = \max_k \sum_{i \in N^{cs}} \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)$$

**Eq. 27**

-  $N^{cs}$  è l'insieme dei nodi considerati centri di soccorso;

-  $i \in N^{cs}$  è un comune origine dei soccorsi;

-  $j \in N$  è un centro urbano destinazioni dei soccorsi;

In maniera analoga può essere calcolato il collegamento che interessa il numero maggiore di percorsi minimi.

$$\text{vulnerabilità}_{\text{cam\_min}}^{\max} = \max_k \sum_i \sum_j n_{ij}^k$$

**Eq. 28**

L'indice totale di vulnerabilità di un arco  $k$  sarà quindi dato dalla somma dei tre indicatori precedentemente normalizzati. Esso quindi, sarà la somma di più contributi e terrà conto:

- della funzione svolta dall'arco all'interno della rete, ovvero delle conseguenze, in termini di aumento dei tempi di percorrenza, date dalla sua chiusura, questa è una misura dell'importanza dell'arco all'interno di una regione di riferimento;
- dell'importanza dell'arco all'interno di percorsi considerati come lifelines, ovvero percorsi utilizzati dai soccorsi durante un'emergenza;
- della centralità rivestita dall'arco all'interno della rete, ovvero di quanti comuni usufruiscano di questo arco per i collegamenti;
- delle caratteristiche geometriche e planimetriche della rete e dei diversi archi che determinano le sue velocità di percorrenza;



- della configurazione della rete, ovvero della possibilità che quell'arco ha di essere sostituito da valide alternative di percorso.

In particolare l'indice normalizzato di vulnerabilità dell'arco  $k$  rispetto alla regione di riferimento sarà dato dalla formula:

$$\text{vulnerabilità}_{\text{reg\_norm}}^k = \frac{\sum_i \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0) - \min_k \sum_i \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)}{\max_k \sum_i \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0) - \min_k \sum_i \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)}$$

Eq. 29

dove:

$$\text{vulnerabilità}_{\min} = \min_k \sum_i \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)$$

Eq. 30

rappresenta il valore relazionato alla chiusura dell'arco meno importante della rete, nel caso in studio pari a zero (ovvero un arco la cui chiusura non influenza i cammini minimi tra tutte le origini e le destinazioni di una regione).

L'indice di vulnerabilità normalizzato rispetto ai percorsi utilizzati dei soccorsi sarà invece dato da:

$$\text{vulnerabilità}_{\text{O/Dsocc\_norm}}^k = \frac{\sum_{i \in C_s} \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0) - \min_k \sum_{i \in C_s} \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)}{\max_k \sum_{i \in C_s} \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0) - \min_k \sum_{i \in C_s} \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)}$$

Eq. 31

in maniera analoga viene normalizzato l'indice che tiene conto dei percorsi minimi interessati dalla chiusura dell'arco.

$$\text{vulnerabilità}_{\text{cam\_min\_norm}}^k = \frac{\sum_i \sum_j (n_{ij}^k) - \min_k \sum_i \sum_j (n_{ij}^k)}{\max_k \sum_i \sum_j (n_{ij}^k) - \min_k \sum_i \sum_j (n_{ij}^k)}$$

Eq. 32

Per cui, **l'indice finale di vulnerabilità** proposto sarà dato dalla somma di questi contributi normalizzati. In particolare:

$$\text{vulnerabilità}_{\text{tot}}^k = \text{vulnerabilità}_{\text{reg\_norm}}^k + \text{vulnerabilità}_{\text{O/Dsocc\_norm}}^k + \text{vulnerabilità}_{\text{perc\_min\_norm}}^k$$

Eq. 33

Per come è stato concepito l'indicatore può assumere un valore compreso tra zero e tre. Inoltre risponde agli obiettivi posti alla base della ricerca, in quanto:

- è calcolato in base a valori di tempi di percorrenza rispondenti alle caratteristiche planimetriche degli archi, in questo senso è correlato alla vulnerabilità strutturale dell'arco stesso;
- è calcolato per i soli archi in cui risulta alta la pericolosità dovuta ad eventi idrogeologici, per cui tiene conto delle reali caratteristiche del territorio;
- risponde alle esigenze della Protezione Civile, perchè tiene conto dei percorsi utilizzati dai mezzi di soccorso durante le emergenze;
- gli indici non sono pesati in base agli spostamenti che li caratterizzano, né in base alla popolazione servita; in questo modo si è scelto di utilizzare un approccio più equo, che valuti tutti gli archi con uguale importanza.

A completamento delle analisi proposte sulla rete è possibile integrare gli indicatori suddetti con altri che valutano l'esposizione di un comune rispetto all'evento considerato e rispetto alla rete stradale che serve quel determinato centro. L'indice per valutare l'esposizione di un comune sarà per cui dato dalla formula:

$$\text{esposizione}_i = \sum_k \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)$$

**Eq. 34**

dove:

- $i, j \in N^c$ ;
- $k \in A^d$ ;

Complessivamente l'esposizione di un comune è quindi data dalla somma degli incrementi dei tempi di percorrenza dati dalla chiusura degli archi deboli, lungo i percorsi minimi con origine nel comune considerato e destinazione tutti gli altri comuni della regione in esame.

L'eq. 34 non tiene conto della popolazione residente nel comune considerato, anche in questo caso si tratta perciò di un indice che valuta tutti i comuni con lo stesso peso. Volendo tener conto della popolazione residente l'eq. 31 può essere riscritta come segue:

$$\text{esposizione}_i^{pes} = \frac{P_i}{P_{tot}} \sum_k \sum_j (t_{ij}^k - t_{ij}^0)$$

**Eq. 35**

dove:

- $P_i$  è la popolazione residente nei comuni di riferimento;
- $P_{tot}$  è la popolazione totale residente nella regione di riferimento.

### **3.2.2. CALCOLO DEI PERCORSI MINIMI: L'USO DI ARCVIEW NETWORK ANALYST**

Nell'ambito delle operazioni da svolgere per l'applicazione della metodologia suddetta si è manifestata l'esigenza della scelta di uno strumento che consentisse non solo di gestire la notevole quantità di dati, ma anche di elaborare gli stessi e fornirne un'utile rappresentazione. Munirsi di strumenti il più possibile adeguati per tali scopi rappresenta quindi un passo fondamentale per la riuscita della ricerca. In questo senso può essere sicuramente osservato, anche analizzando il grafico 1, come la maggior parte dei dati raccolti possiede uno stretto riferimento al territorio (analisi della pericolosità, analisi territoriale, identificazione e studio della rete stradale etc), inoltre, per come la metodologia è stata concepita risulta applicabile ad ambiti territoriali piuttosto estesi. Uno degli strumenti commerciali che risponde alle esigenze di rappresentare, gestire, elaborare e analizzare una grande quantità di dati che possiedono una forte interazione col territorio e un preciso riferimento nello spazio sono senza dubbio i cosiddetti GIS (Geographical Information System). I software GIS infatti non solo rappresentano potenti mezzi di archiviazione, georeferenziazione e rappresentazione dei dati, ma sono dotati di avanzati strumenti per le analisi e le interrogazioni, capaci di offrire validi risultati a supporto delle decisioni.

Per quanto attiene l'utilizzo del GIS per lo studio delle infrastrutture di trasporto, e dei sistemi a rete, le applicazioni GIS in questo campo sono diventate sempre più numerose e popolari. Si fa riferimento a tali applicazioni come GIS-T. Una sintesi dei maggiori programmi GIS-T e delle principali operazioni che questi sono capaci di svolgere si può trovare descritta da Waters [63]. In particolare, tra le potenzialità della maggior parte dei programmi GIS-T operativi, si indica la possibilità di poter produrre ed elaborare matrici, l'implementazione al loro interno di procedure di modellazione, come l'analisi dei cammini minimi (SPA, Shorter Path Analysis), modelli di gravità e interazione spaziale, modelli di allocazione e locazione dei servizi, modelli di flusso nelle reti, etc. Programmi GIS di tale tipo risultano uno strumento quasi indispensabile utilizzato in particolare dalle amministrazioni pubbliche. Gli algoritmi per il calcolo dei

camini minimi possono essere considerati dei precursori di moltissime delle funzionalità oggi presenti all'interno dei programmi GIS-T. Algoritmi di tale tipo devono essere molto flessibili e capaci di rappresentare al meglio possibile le condizioni che si verificano in realtà, per questa ragione devono immagazzinare tutta una serie di variabili e costi per ciascun arco di una rete. Ad esempio i pacchetti GIS più sofisticati comprendono al loro interno funzioni di impedenza che permettono di specificare sensi unici di percorrenza, semafori, etc. [63].

Un pacchetto applicativo presente sul mercato per l'analisi delle reti stradali è Arcview Network Analyst. Quest' ultimo è un modulo aggiuntivo di Arcview specificatamente studiato per la risoluzione di problemi inerenti le reti, non solo infrastrutture di trasporto, ma anche reti idrografiche, pipelines, etc. Il modello base di rete utilizzato dal programma è costituito da archi, ai quali viene associato un attributo, noto come impedenza. L'impedenza rappresenta il costo di viaggio del collegamento, oppure una misura della resistenza allo spostamento caratteristica dell'arco stesso. Le principali operazioni rese possibili da Arcview Network Analyst sono:

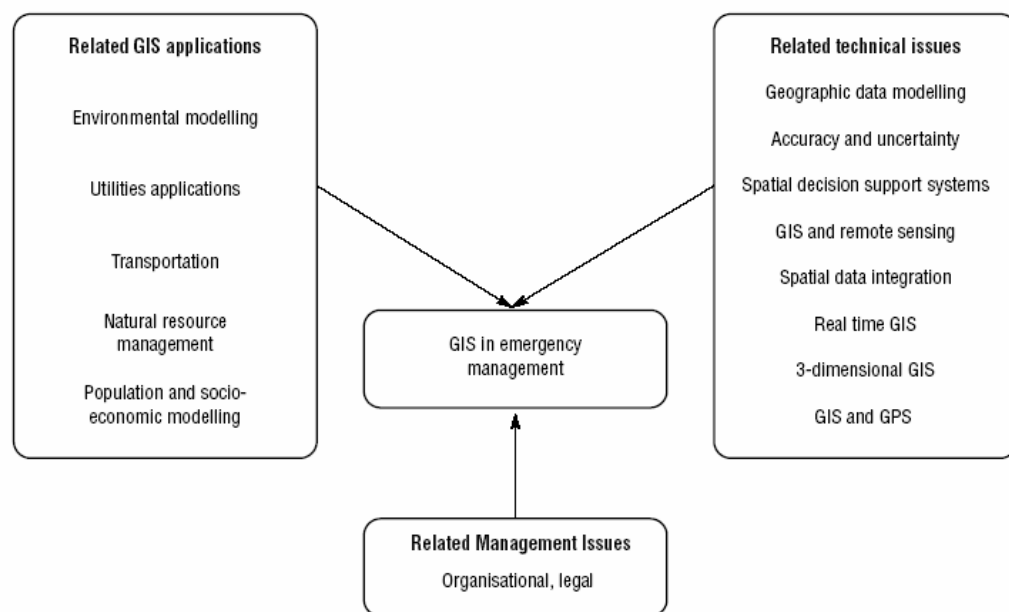
- analisi del tempo di viaggio;
- ricerca delle direzioni stradali;
- ricerca dei camini minimi e dei percorsi ottimali;
- definizione di aree di servizio;
- costruzione di matrici origine destinazione.

L'uso del GIS e delle sue applicazioni all'interno della ricerca che si occupa di gestione delle emergenze si è sempre dimostrato produttivo e proficuo, infatti, come già specificato, molti dei problemi critici che si incontrano si caratterizzano per una forte componente spaziale. Tuttavia, la produzione scientifica sull'uso del GIS nelle diverse fasi dell'Emergency Management risulta piuttosto limitata e giovane. Un utile riferimento in tal senso può essere il lavoro di Cova [23]. In questo articolo, infatti, la bibliografia relativa al campo della gestione delle emergenze (CEM, Comprehensive Emergency Management) è suddivisa e ordinata con riferimento alle quattro fasi nelle quali viene usualmente suddivisa la gestione delle emergenze:

- mitigazione;
- preparazione;

- risposta;
- ripresa.

In particolare, la fase della preparazione e quella della risposta possono essere considerate come congiunte. Per ciascuna delle tre fasi considerate sono riassunti gli ambiti spaziali di riferimento, le possibili aree di applicazione e gli esempi che possono essere trovati in letteratura [23]. Inoltre l'Emergency Management non rappresenta l'unico campo di applicazione, ma possono esserne individuati di altri strettamente legati a questo. La figura 5 riassume i possibili ambiti di applicazione del GIS.



**Figura 9** Aree relazionate all'uso del GIS nella gestione delle emergenze [23]

Concentrando invece l'attenzione sugli esempi di applicazione GIS per quanto riguarda l'argomento specifico oggetto della tesi, anche in questo caso possono essere trovate diverse applicazioni.

Jenelius e altri [36] ad esempio utilizzano il GIS per il calcolo delle misure di importanza dei singoli collegamenti, e per l'esposizione dei comuni, l'ambito spaziale di riferimento è il Nord della Svezia. Chang [18] sfrutta le potenzialità dei sistemi GIS per il calcolo dell'indicatore di accessibilità proposto, e per studiare gli impatti socioeconomici derivati dalla chiusura di alcuni collegamenti stradali e ferroviari in caso di terremoto. Li Yan [39] sfrutta il GIS per calcolare, all'interno di un area urbana, un indicatore di probabilità di accessibilità che misura il grado di connessione di ogni

residente al punto in cui si dipartono i soccorsi. Sempre un'applicazione del GIS in ambito urbano può essere trovata nel lavoro di Cafiso e Condorelli [14] in particolare in questo caso vengono sfruttate diverse potenzialità ed estensioni di Arcgis (3D Analyst, Spatial Analyst, Network Analyst) per calcolare un indice di danno complessivo dei tronchi stradali per quanto riguarda il rischio sismico. Sempre Cafiso e altri [13] utilizzano il GIS per lo studio del rischio insistente sulla rete stradale extraurbana in caso di diversi eventi (sismici, idrogeologici, incendi, sversamento sostanze pericolose, etc), l'area geografica dei riferimento in questo caso è la provincia di Catania. Cutter [25] utilizza il GIS per lo studio della vulnerabilità di aree geografiche, quest'ultima è data dalla combinazione di vulnerabilità sociale e vulnerabilità biofisica. La prima è studiata calcolando specifici indicatori socioeconomici, la seconda è riferita alla perimetrazione e allo studio del livello di rischio che insiste sul territorio. Cova [21] utilizza il GIS per lo sviluppo di un metodo sistemico per l'identificazione delle aree urbane che possono trovare difficoltà durante un'operazione di evacuazione, a causa del disegno e della strutturazione della rete. L'articolo descrive un algoritmo euristico capace di dare soluzioni efficienti e di alta qualità in un contesto GIS. Infine Sohn [56] utilizza l'estensione Network Analyst per la costruzione delle matrici dei costi (distanza di trasporto) lungo la rete stradale delle contee del Maryland e il relativo calcolo di un indice di accessibilità.

Per lo sviluppo della presente ricerche sono state utilizzate le seguenti risorse:

- Arcview GIS, come strumento di base per l'archiviazione e la georeferenziazione dei dati, per la realizzazione della cartografia tematica e per l'elaborazione dei dati;
- l'estensione di Arcview, Network Analyst per la ricerca dei camini minimi, e per la costruzione delle matrici dei tempi di percorrenza.

Per l'attribuzione dei tempi di percorrenza è stata utilizzata una procedura studiata nello specifico da due autori in attesa di pubblicazione, che permette di attribuire il tempo di percorrenza all'arco in base alle sue caratteristiche geometriche e di progetto (caratteristiche planimetriche).

La procedura studiata doveva corrispondere agli obiettivi di:

- essere applicabile sull'intera rete regionale (insieme di strade statali, provinciali e comunali);

- offrire una misura di velocità riferita alle caratteristiche progettuali e geometriche delle strade;
- in relazione al punto precedente ovviare al problema di non poter disporre di elaborati progettuali.

Per quest'ultima ragione per la determinazione delle velocità di ogni segmento stradale è stata utilizzata la rete acquisita dalle carte tecniche regionali in scala 1:10.000. Su tale rete sono state eseguite successivamente due operazioni:

- applicazione alle polilinee costituenti la rete dell'algoritmo di "Douglas Peucker", tale algoritmo di generalizzazione, infatti, applicato a una spezzata, permette di ridurre drasticamente il numero di vertici;
- sostituzione alle polilinee generalizzate di una spline (curva di Bezier) passante per i vertici della polilinea in modo che quest'ultima risulti il più possibile aderente al tracciato stradale.

Per l'attribuzione a ogni arco stradale della velocità di percorrenza e conseguentemente dei tempi di percorrenza è stato necessario formulare alcune ipotesi, dedotte dalle considerazioni che stanno alla base della costruzione dei diagrammi di velocità (D.M. 5/11/2001):

1. il veicolo è considerato come veicolo isolato, la sua velocità è quindi influenzata unicamente dalle caratteristiche geometriche e progettuali della strada;
2. si assume che le pendenze longitudinali non influenzino le velocità di percorrenza del veicolo;
3. la traiettoria percorsa dal veicolo coincide con l'asse stradale;
4. in rettilineo, ovvero per  $R$  tendente a infinito il veicolo si muove di moto uniformemente vario, con accelerazione  $a = \pm 0,8 [m \times s^{-2}]$ ;
5. in curva si assume che il veicolo si trovi al limite dello sbandamento;

L'ipotesi 1 in realtà difficilmente è verificata, tuttavia risulta sicuramente valida per gran parte delle strade statali e provinciali della regione Sardegna, quindi può essere applicata a reti stradali ricadenti in aree scarsamente popolate e caratterizzate da volumi di traffico piuttosto bassi. Inoltre se la ragione dello studio è la valutazione della vulnerabilità di una rete stradale, e nel concetto di vulnerabilità ricade una vulnerabilità

di tipo strutturale (legata cioè alle caratteristiche progettuali della strada), l'ipotesi ben si adatta a quest'ultimo obiettivo.

Per quanto attiene l'ipotesi 3 risulta accettabile dal momento che la scala di analisi per gli studi effettuati è una scala regionale o provinciale e che i tracciati sono stati ricavati da carte tecniche in scala 1:10.000.

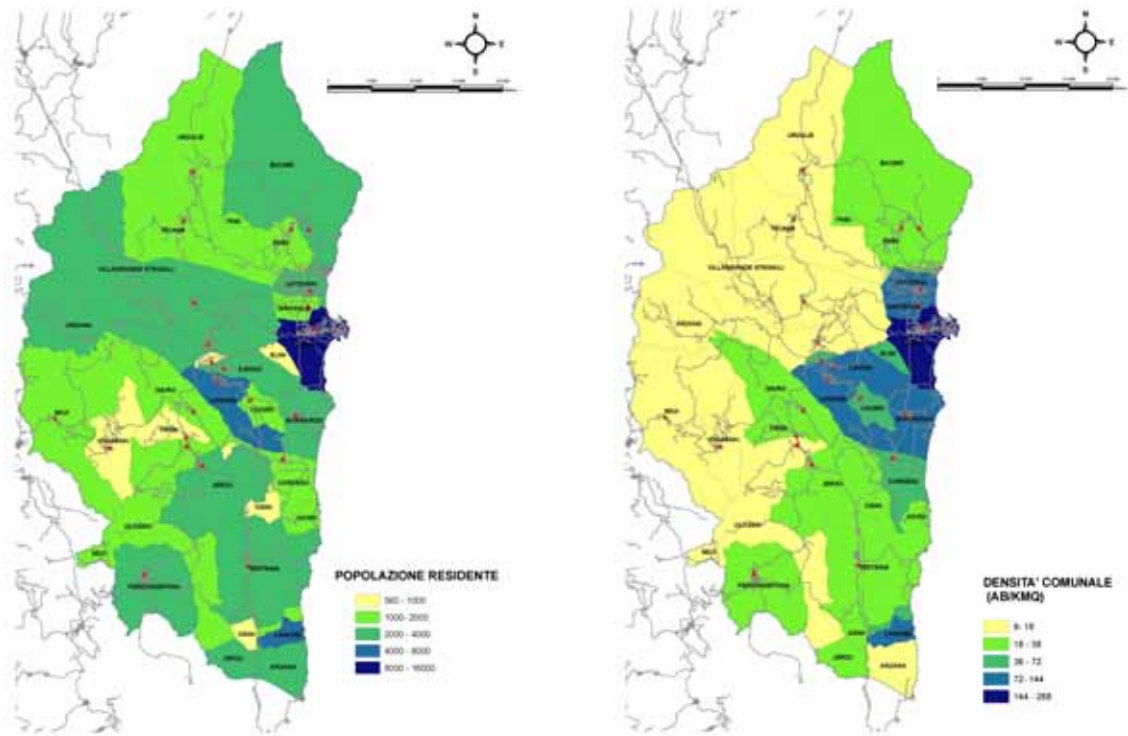


## **4. UN ESEMPIO APPLICATIVO: STUDIO DELLA VULNERABILITÀ DELLA RETE VIARIA DELLA PROVINCIA D'OGLIASTRA**

### ***4.1. LA PROVINCIA D'OGLIASTRA: ANALISI DEL TERRITORIO E DELLA RETE STRADALE***

Le misure di vulnerabilità presentate in precedenza sono state applicate alla rete stradale della provincia d'Ogliastra.

La provincia d'Ogliastra è una delle nuove quattro province introdotte dalla L.R. 4/1997 in Sardegna, è composta da 23 comuni, tutti rientranti nella vecchia provincia di Nuoro. Dal confronto di alcuni dati socio economici con le altre province è possibile rilevare diverse criticità. Infatti in quest'area è residente solo il 3,6% della popolazione totale dell'isola, inoltre tutti i comuni, ad eccezione del capoluogo di Tortolì risultano in decremento demografico, complessivamente, infatti la popolazione presenta un'inflexione pari al 3,3% tra il 1991 e il 2001. L'indice di vecchiaia è piuttosto alto, ma si attesta su valori prossimi a quelli regionali (109,4%), mentre l'indice di dipendenza è elevato (46,1%) a testimonianza del mancato ricambio generazionale. La dimensione demografica dei comuni è piuttosto ridotta, infatti, come si evince dalla figura 10 la maggior parte dei comuni presenta una popolazione residente inferiore ai 5000 abitanti. Solo il comune di Tortolì supera la soglia dei 10.000. La popolazione si concentra lungo la costa, dove più agevoli sono i collegamenti e migliori sono i servizi e le possibilità lavorative. Questo è chiaramente riscontrabile anche analizzando la densità territoriale.



**Figura 10 Popolazione residente (2006) e densità territoriale nella provincia d'Ogliastra**

Per quanto attiene gli indicatori socioeconomici la provincia presenta il reddito disponibile più basso della Sardegna, e anche in numero di unità locali più basso. Settori di specializzazione produttiva sono individuabili nelle costruzioni, e nel turismo (numero di alberghi e ristoranti).

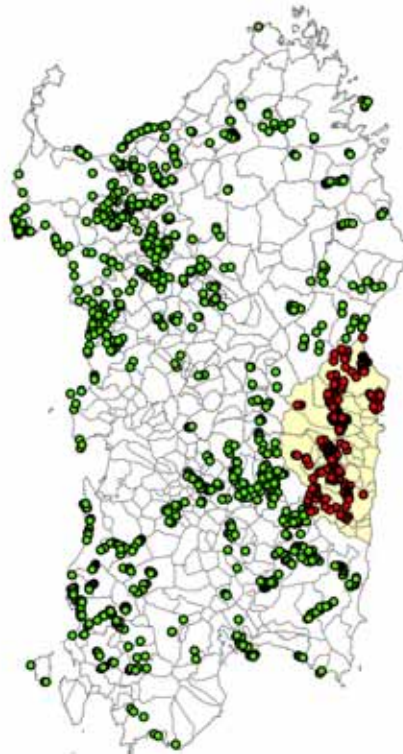
Complessivamente si può senza dubbio affermare che la regione presenti diverse criticità, quest'ultime sono in parte dovute a vicende storiche, e in parte anche alle sue caratteristiche geografiche. La morfologia del territorio è prevalentemente accidentata e montuosa e non ha mai permesso agevoli comunicazioni, né tra i paesi interni alla provincia, né verso il resto della regione. La morfologia e le altre caratteristiche del territorio rappresentano anche una delle cause dei diversi fenomeni di dissesto idrogeologico che hanno colpito la regione in passato. Il territorio ogliastrino ricade in due dei sette sub-bacini in cui è suddiviso il bacino unico regionale: il bacino Sud-Orientale e il bacino del Flumendosa, Campidano e Cixerri. Il settore settentrionale del bacino Sud-Orientale, interamente compreso nel territorio ogliastrino mostra una spiccata propensione al dissesto, in esso si sono verificate la maggior parte dei fenomeni franosi su substrato paleozoico di tutta la Sardegna. Inoltre, parte del territorio è caratterizzato da formazione carbonatiche mesozoiche molto particolari, che si

distinguono per superfici sub pianeggianti delimitate da strapiombi, di altezze anche superiori ai cento metri. Tali formazioni, denominate “tacchi” si caratterizzano per frane di crollo, con rotolamento lungo i pendii di blocchi, spesso anche di notevoli dimensioni che possono raggiungere anche distanze di rilievo (fig. 11)



**Figura 11 I tacchi, formazioni carbonatiche caratteristiche dell'Ogliastra e frane di crollo lungo la S.S. n°198**

Localmente si possono osservare anche fenomeni di scivolamento traslativo di blocchi carbonatici di grosse dimensioni. L'incidenza dei fenomeni di frana in questa regione è ben rappresentata dalla fig. 12, nella quale sono rappresentate le frane inventariate all'interno del progetto IFFI, “Inventario dei fenomeni franosi in Italia” [54]. È chiaramente riscontrabile infatti come l'Ogliastra (rappresentata in giallo) sia una delle province a maggiore incidenza di fenomeni franosi



**Figura 12 Frane registrate in Sardegna e in Ogliastra (elaborazione derivante dai dati del progetto IFFI)**

La Provincia d'Ogliastra è stata caratterizzata in passato da diverse alluvioni. Ciò è dovuto alla tipologia di clima che si riscontra in queste aree, caratterizzato da precipitazioni brevi e intense, che spesso si risolvono in fenomeni temporaleschi e talora alluvionali. Il sistema idrografico è per lo più contrassegnato da regimi tipicamente torrentizi, con alternanza di periodi di siccità a periodi di piena che possono degenerare in vere e proprie alluvioni. Questi fenomeni sono anche aiutati dalle caratteristiche dei terreni, che favoriscono un ruscellamento delle acque abbastanza consistente e rapido. In passato la regione è stata colpita da diverse alluvioni, alcune con conseguenze molto gravi. Nel 1951, ad esempio una gravissima alluvione interessò la Sardegna centrale, una delle aree maggiormente colpite fu la valle del rio Pardu, in Ogliastra, tale alluvione determinò l'abbandono di due centri abitati (Osini e Gairo) giudicati instabili e pericolosi per la popolazione. In tempi più recenti l'alluvione del 2004 oltre a provocare ingenti danni alle infrastrutture (figura 13) e agli edifici causò la morte di due persone. Tali fenomeni, a causa anche dei cambiamenti climatici globali, si ripetono con tempi sempre minori e intensità crescenti. Nel natale del 2006 violente precipitazioni hanno causato l'interruzione delle comunicazioni lungo la S.S. n°198, all'altezza dell'abitato di

Gairo, e sempre lungo la valle del rio Pardu si è verificata la frana lungo la S.P. n°11, anch'essa costeggiante la valle del Pardu.



**Figura 13 Danni lungo la S.S. n° 389 nell'alluvione del 2004 (sinistra) e recenti dissesti lungo la S.P. 11 (destra).**

Per le sue caratteristiche demografiche, e per la particolare esposizione a fenomeni di dissesto di natura idrogeologica la regione Ogliastrina sembra essere il territorio ottimale per l'applicazione degli indicatori di vulnerabilità identificati in precedenza.

Una volta scelta l'area di studio è stata studiata la rete stradale di riferimento(fig. 14). L'ossatura principale della rete è rappresentata da 4 strade statali:

- la S.S. n°125 “Orientale Sarda”, che garantisce i collegamenti tra l'Ogliastra e il Nord e Sud della Sardegna. Tale strada permette anche le comunicazioni interne alla provincia tra i comuni costieri;
- la S.S. n°198 che garantisce i collegamenti tra i centro della provincia e i comuni periferici, e tra la provincia stessa e il centro-sud della Regione Sardegna;
- la S.S. n°390 di collegamento tra il capoluogo di Lanusei e la costa;
- la S.S. n°389 poco utilizzata per i collegamenti interni alla provincia ma connessione principale con il nord dell'Isola.

Per quanto attiene le caratteristiche geometriche e di progetto della rete, sicuramente questa presenta diverse criticità: sono del tutto assenti le strade a carreggiate separate, inoltre la quasi totalità delle strade statali e provinciali non possono essere assimilabili neanche alla tipologia F1 per l'assenza di banchine per la

maggior parte del loro sviluppo. Unica eccezione è la S.S. n°389 assimilabile a una C2, e la nuova S.S. n°125 in fase di completamento, con una sezione tipo C1.

Per quanto riguarda le caratteristiche planoaltimetriche le strade presentano tortuosità e pendenze elevate, soprattutto nella parte interna della provincia, ciò a causa dell'orografia del territorio che non presenta zone pianeggianti, tranne che per piccole estensioni lungo la costa. La rete, per la maggior parte della sua estensione è inoltre caratterizzata dai flussi piuttosto ridotti.

La rete è stata acquisita dalla Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10.000. Ad ogni tronco della rete sono stati associati una serie di attributi come il nome della strada, la sua classificazione funzionale, lo stato della pavimentazione, la larghezza, la lunghezza dell'arco, la velocità media dell'arco, la classificazione amministrativa (Strade Statali, Strade Provinciali o Comunali) e infine il tempo di percorrenza (minutes). La rete considerata è quella stradale di riferimento della provincia d'Ogliastra, inoltre, per poter permettere i collegamenti anche quando un arco risultava interrotto è stata considerata anche la rete stradale esterna alla provincia.

Sulla rete così identificata si è proceduto all'individuazione degli archi deboli, ovvero quegli archi nei quali si riscontra una pericolosità ad eventi idrogeologici (frane e piene) elevata. Per la delimitazione degli archi deboli si è fatto riferimento al PAI, Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Sardegna [54]. Sono stati considerati deboli quegli archi ricadenti in aree Hg3 e Hg4. Per quanto riguarda il rischio frane le definizioni utilizzate nel PAI sono:

- **aree Hg3 frane:** *“aree con pericolosità elevata con pendenze >50% ma con copertura boschiva rada o assente; frane di crollo e/o scorrimento quiescenti, fenomeni di erosione delle incisioni vallive. Fonti di scavo instabili lungo le strade; aree nelle quali sono inattività o sono state svolte in passato attività minerarie che hanno dato luogo a discariche di inerti, cave a cielo aperto, cavità sotterranee con rischio di collasso del terreno e/o subsidenza (i siti minerari dismessi inseriti nella Carta della pericolosità di frana); aree interessate in passato da eventi franosi nelle quali sono stati eseguiti interventi di messa in sicurezza”.*
- **aree Hg4 frane:** *“aree con pericolosità molto elevate con manifesti fenomeni di instabilità attivi o segnalati nel progetto AVI o dagli Enti Locali interpellati o rilevate direttamente dal Gruppo di lavoro”.*

Per quanto riguarda invece la definizione delle aree a rischio piene si fa riferimento a quanto stabilito dal DPCM 29/09/98 le aree Hi3 e Hi4 corrisponde un tempo di ritorno pari rispettivamente a 50 e 100 anni.

La figura 15 rappresenta la sovrapposizione delle aree a rischio frane e piene con la rete stradale. Sono state quindi identificati quei tratti stradali considerati deboli, nel baricentro di tali tratti sono state posizionate le cosiddette “barriere” che rappresentano le possibili interruzioni dell’arco date da una frana o da una piena. A questo punto possono verificarsi le seguenti posizioni:

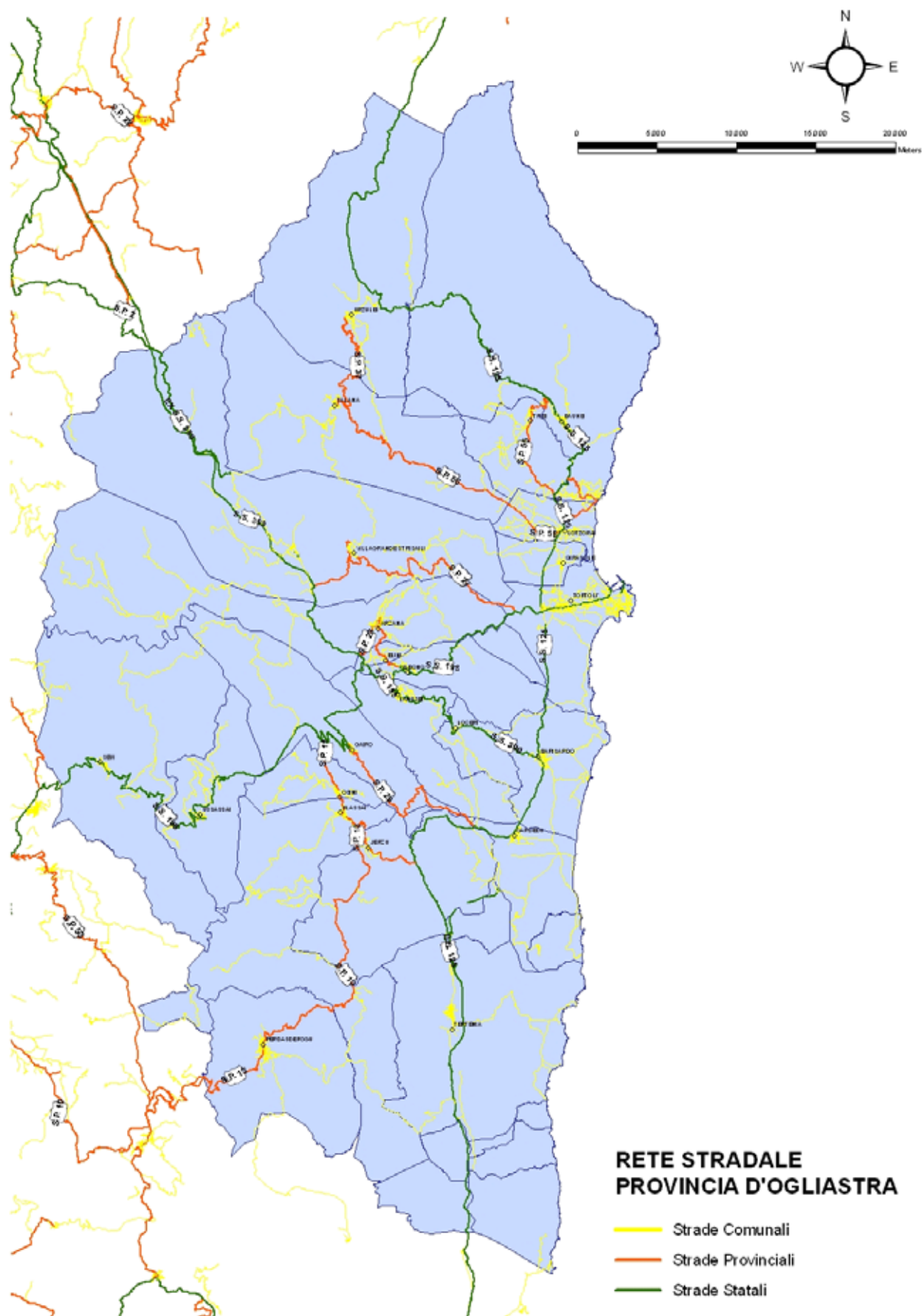
- più barriere all’interno dello stesso arco;
- nello stesso arco barriere date dall’intersezione con zone H4 e barriere date dall’intersezione con zone H3.

In questi due casi si è assunto che nell’arco sia posizionata una sola barriera, infatti, considerando le conseguenze dell’interruzione dell’arco il posizionamento delle barriere è indifferente.

Il numero di barriere (e conseguentemente di archi deboli considerati), è stato ulteriormente diminuito non considerando le barriere rientranti in ambito urbano, dal momento che lo studio riguarda le strade extraurbane, e le barriere ricadenti all’interno di “archi appesi” ovvero archi che non risultano collegati ad altri all’interno della rete.

La figura 16 rappresenta quindi gli archi deboli considerati per le elaborazioni successive. Si noti che degli archi deboli considerati il 20,8% interessa strade statali, il 15,3% interessa strade provinciali e il restante 63,8% interessa strade comunali, poco utilizzate per le comunicazioni interne ed esterne alla provincia. Inoltre il 75,5% degli archi deboli considerati lo è a causa di una possibile frana interessante la sede stradale, mentre le cause di chiusura dovute a fenomeni di piena sono solamente il 24,5%.





**Figura 14 Rete stradale della Provincia d'Ogliastra**



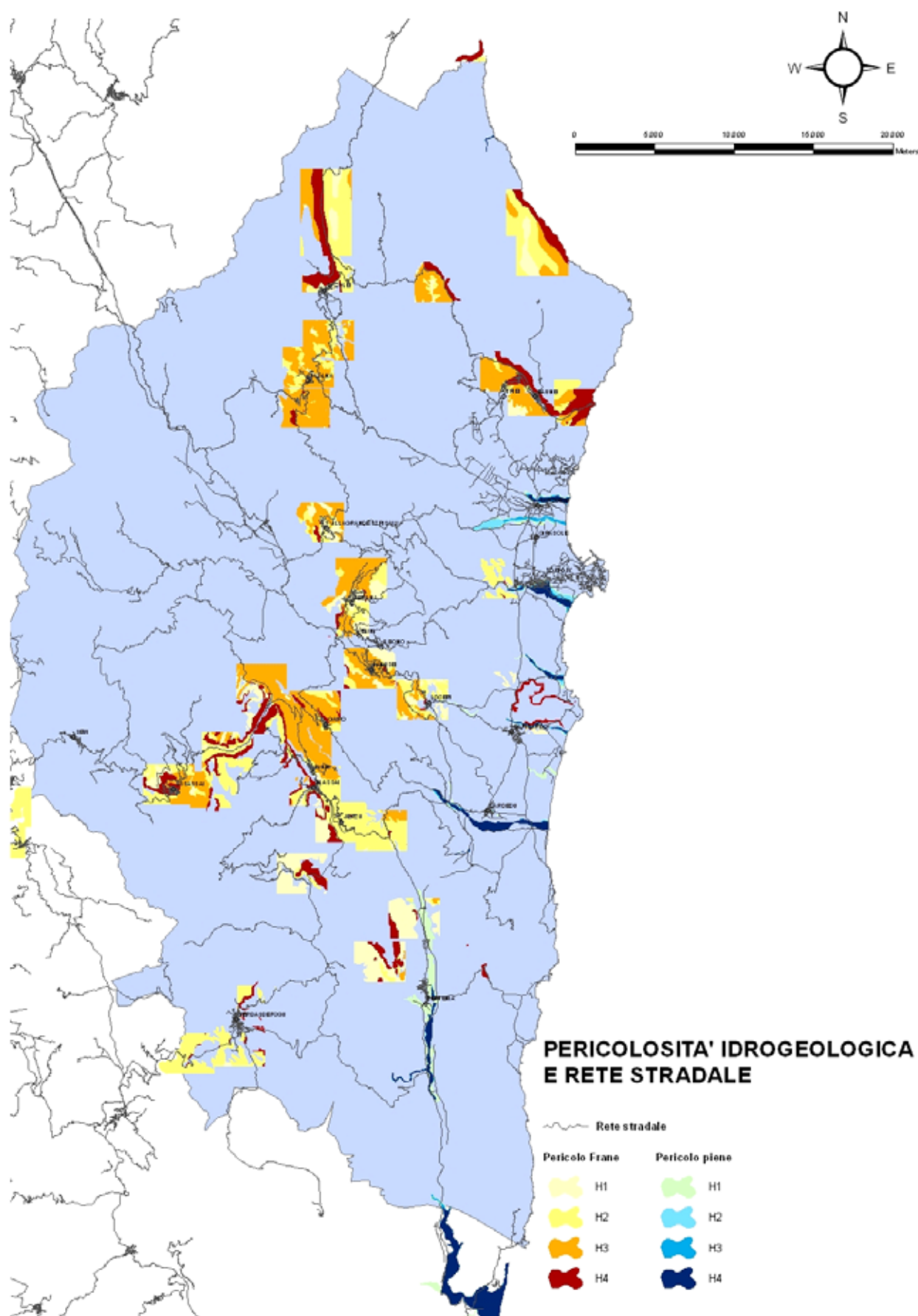
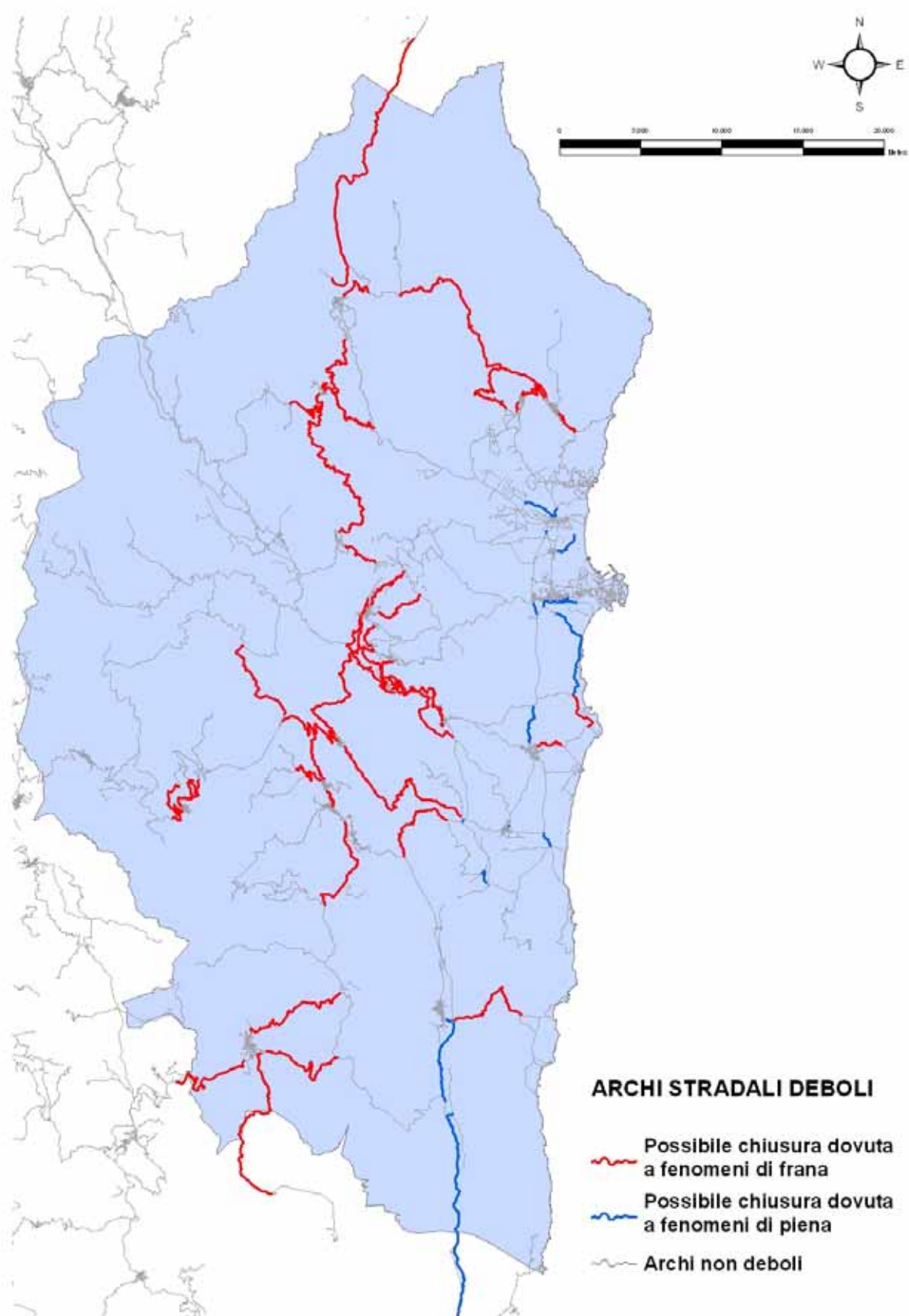


Figura 15 Sovrapposizione aree PAI alla rete stradale



**Figura 16** Archi deboli nella rete in esame.

## **4.2. ANALISI DEI RISULTATI**

Una volta costruita la rete di riferimento e individuati gli archi deboli su questi sono state calcolate le misure di vulnerabilità proposte nello studio.

Nella condizione indisturbata, ovvero quando tutti i tronchi della rete risultano percorribili, è stato utilizzato l'applicativo Network Analyst per la restituzione della matrice dei tempi di percorrenza. Si tratta di una matrice 23X23 in quanto 23 sono i comuni ricadenti all'interno della provincia d'Ogliastra. In seguito, mediante un procedimento iterativo sono stati interrotti uno per volta i 163 archi deboli individuati in precedenza. In questo modo ad ogni tronco debole della rete viene associata una matrice quadrata dei tempi di percorrenza calcolati lungo i percorsi minimi che congiungono 23 origini a 23 destinazioni. Questi tempi chiaramente risulteranno maggiori, o al più uguali ai tempi di percorrenza calcolati quando tutta la rete risulta percorribile.

Ad ogni arco  $k$  è stata quindi in un primo momento associata una matrice dei tempi incrementati e in un secondo momento la matrice differenza tra la matrice con l'arco  $k$  interrotto e la matrice originaria. Un'ultima elaborazione ha consistito nell'associare a ciascun arco la somma delle differenze, ovvero degli incrementi dei tempi di percorrenza causati dalla chiusura dell'arco stesso. Si sono verificate due situazioni:

- la sommatoria è pari a zero: in questo caso la chiusura dell'arco stradale non ha influito sulle comunicazioni interne alla regione;
- la sommatoria è maggiore di zero: l'arco in questo caso viene utilizzato negli spostamenti interni alla regione.

In questo modo per ogni tronco debole della rete è stata applicata la formula 23 che attribuisce ad ognuno un valore dell'indice di vulnerabilità regionale. I risultati sono mostrati nella figura 17. Com'è possibile notare il valore di tale indice risulta maggiore in prossimità dell'area centrale della regione e in particolare per quelle strade che circondano la valle del Rio Pardu: la S.S. n°198, la S.P. n°11, la S.P. n°28 e la S.S. n°125 tra l'abitato di Jerzu e quello di Cardedu (è proprio lungo l'arco appartenente a tale strada che infatti si registra il valore maggiore).

La figura 18 mostra invece i risultati derivanti dall'applicazione della formula 24. Ovvero sono stati calcolati gli incrementi dei tempi di percorrenza considerando i soli

percorsi utilizzati dai mezzi di emergenza. In questo caso quindi gli incrementi di tempo riguardano solo due origini: i centri di Tortolì e Lanusei, capoluoghi di provincia e sede dei principali servizi. Le destinazioni sono invece tutte gli altri comuni della provincia. In questo caso gli archi che assumono maggiore importanza sono concentrati soprattutto nella parte centrale, mentre gli archi che collegano centri periferici tra di loro non possiedono nessuna importanza.

I due indicatori fin qui calcolati sono direttamente proporzionali a due fattori: quanti comuni utilizzano quel tronco stradale e alla possibilità che quel tronco ha di essere sostituito da percorsi alternativi validi. Può quindi accadere che tronchi molto utilizzati abbiano in realtà conseguenze trascurabili in termini di incremento dei tempi di percorrenza, quando possiedono buone alternative di percorso. Per questa ragione è utile valutare l'importanza che il tronco riveste all'interno della rete calcolando il numero di percorsi minimi interessati dalla sua chiusura (eq. 25).

Considerando una certa origine e una destinazione si può affermare che un tronco stradale interessa il percorso minimo che unisce quell'origine a quella destinazione quando l'incremento del tempo di percorrenza dato dalla sua chiusura non è nullo. Ogni arco sarà quindi caratterizzato da un certo numero di camini minimi, maggiore è quest'ultimo maggiore sarà l'importanza che l'arco riveste nei collegamenti tra i centri della provincia. La figura 19 rappresenta per ogni arco il numero di percorsi minimi che viene interessato dalla chiusura dello stesso. Anche in questo caso i tronchi con maggiore importanza sono quelli interni alla regione nei collegamenti che circondano la valle del Pardu. Un ruolo centrale per le comunicazioni della provincia è anche svolto dalla S.S. n° 125, che garantisce i collegamenti lungo la costa.

Per ogni arco si possono quindi distinguere tre contributi: uno dato dall'incremento dei tempi di percorrenza totali, uno dato dall'incremento dei tempi nelle operazioni di soccorso e uno dato dal numero di camini minimi interessati dalla chiusura dell'arco. I tre contributi non incidono nella stessa maniera. Il grafico 3 mette a confronto il valore normalizzato dei tre indicatori visti in precedenza, ad ogni numero dell'asse delle x corrisponde un arco della rete in esame. Com'è possibile notare l'apporto dei tre indicatori è diverso caso per caso e la somma di questi tre apporti è stata considerata per calcolare il valore totale dell'indice. Ad esempio si noti come le barriere 8, 11 e 23 si caratterizzino per comportamenti simili, queste ultime fanno riferimento a tronchi stradali tutti localizzati lungo la S.S. n°125 e in particolare, tra

l'abitato di Lotzorai e Girasole, tra il comune di Jerzu e quello di Cardedu, e tra il comune di Barisardo e Tortoli. Questi tronchi stradali sono tutti caratterizzati da un alto valore del numero di camini minimi, ma da valori molto inferiori e simili degli indicatori di vulnerabilità regionale e di vulnerabilità rispetto ai soccorsi. Questo accade perchè la S.S. n°125 è una strada molto utilizzata sia per i collegamenti tra i comuni costieri, che per i collegamenti tra interno della provincia e costa. Diversamente si può rilevare per la barriera 55 che corrisponde a un tronco della S.P. n°11 all'altezza dell'abitato di Osini: in questo caso si rileva un alto valore dell'indicatore di vulnerabilità regionale, e un valore relativamente basso della vulnerabilità rispetto ai soccorsi, questo accade perchè tale tratto della S.P. n°11, e tutta la S.P. n°11 in generale si caratterizza per una mancanza dei percorsi alternativi. I valori maggiori di tutti e tre gli indicatori si rilevano d'altra parte nel tronco 82, sulla S.S. n°125 tra l'abitato di Jerzu e quello di Cardedu, in questo caso si tratta di un tronco stradale molto importante per le comunicazioni dei comuni della valle del Pardu e le conseguenze date dalla sua chiusura risultano notevoli a causa della mancanza di percorsi alternativi.

La figura 20 infine rappresenta il valore totale dell'indice di vulnerabilità ad eventi idrogeologici di ogni arco della rete in esame (eq. 33). L'arco più vulnerabile è quello già citato posizionato lungo la S.S. n°125 tra il comune di Jerzu e il comune di Cardedu. Si tratta infatti di un collegamento chiave all'interno della rete, che permette i collegamenti tra i comuni costieri e quelli della parte centrale meridionale della provincia. Gli altri archi che presentano un alto indice di vulnerabilità sono sempre localizzati lungo la S.S. n°125 e lungo altre strade localizzate nella parte centrale della provincia, come la S.S. n°198 e la S.P. n°11. Un basso indice di vulnerabilità si riscontra invece lungo gli archi stradali localizzati nella parte periferica della rete, in particolare nella zona settentrionale della provincia.

Nel caso di chiusura dell'arco maggiormente vulnerabile della rete può essere interessante analizzare le conseguenze sui comuni della Provincia, in termini di incrementi dei tempi di percorrenza nei collegamenti tra comuni e comuni. La figura 21 indica gli incrementi dei tempi di percorrenza dati dalla chiusura dell'arco più vulnerabile. I comuni maggiormente penalizzati sono quelli localizzati nella parte centro meridionale come Jerzu, Perdasdefogu e Tertenia, ma anche i comuni localizzati lungo la parte costiera centro settentrionale. Della chiusura dell'arco invece non ne risentono i comuni interni della provincia, si tratta infatti di un collegamento per lo più utilizzato

nelle comunicazioni lungo la costa. Tale situazione potrebbe trovare sicuro giovamento dal completamento della nuova S.S. n°125 che non solo garantisce un'alternativa di percorso al vecchio tracciato, ma risulta meno vulnerabile anche dal punto di vista strutturale, perchè costruita secondo i più moderni criteri di progettazione. Il ragionamento sopra esposto per l'arco più vulnerabile può essere ripetuto per tutti gli altri archi deboli della rete. Detto in altre parole per ogni arco è possibile valutare quali sarebbero i comuni che potenzialmente risentirebbero di più della sua chiusura

A conclusione sono state realizzate alcune elaborazioni per lo studio della vulnerabilità comunale. Può essere interessante andare a vedere quali comuni risentirebbero di più della chiusura degli archi vulnerabili. Ciò può essere fatto seguendo un approccio di tipo egualitario, e considerando tutti i comuni nella stessa maniera a prescindere dalla popolazione residente, o tenendo conto di quest'ultima. Per la valutazione della prima può essere utilizzata l'equazione 34, di cui si dà rappresentazione dei risultati in figura 22. in questo caso i comuni maggiormente vulnerabili sono localizzati nella parte centro meridionale della provincia, in particolare il comune che presenta un indice di vulnerabilità elevato è quello di Ussassai. La situazione è completamente ribaltata se si tiene conto della popolazione residente, applicando l'equazione 35. I risultati di quest'ultima elaborazione sono rappresentati nella figura 23: in questo caso il comune maggiormente vulnerabile è Tortolì, mentre il comune che prima risultava più vulnerabile, avendo una popolazione residente piuttosto esigua, presenta in questo caso una vulnerabilità bassa.

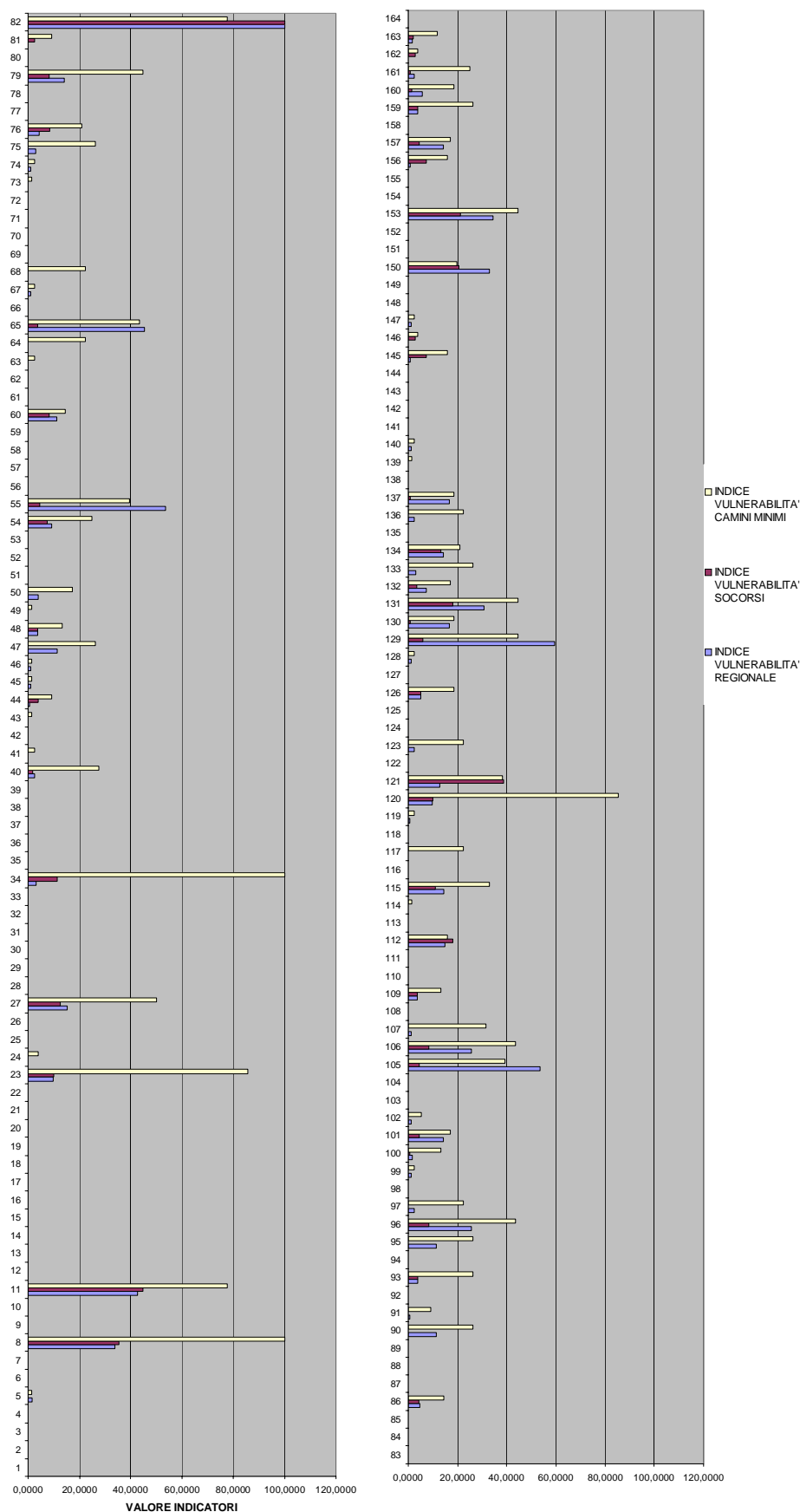


Grafico 3 Confronto tra i termini normalizzati dell'indice totale di vulnerabilità

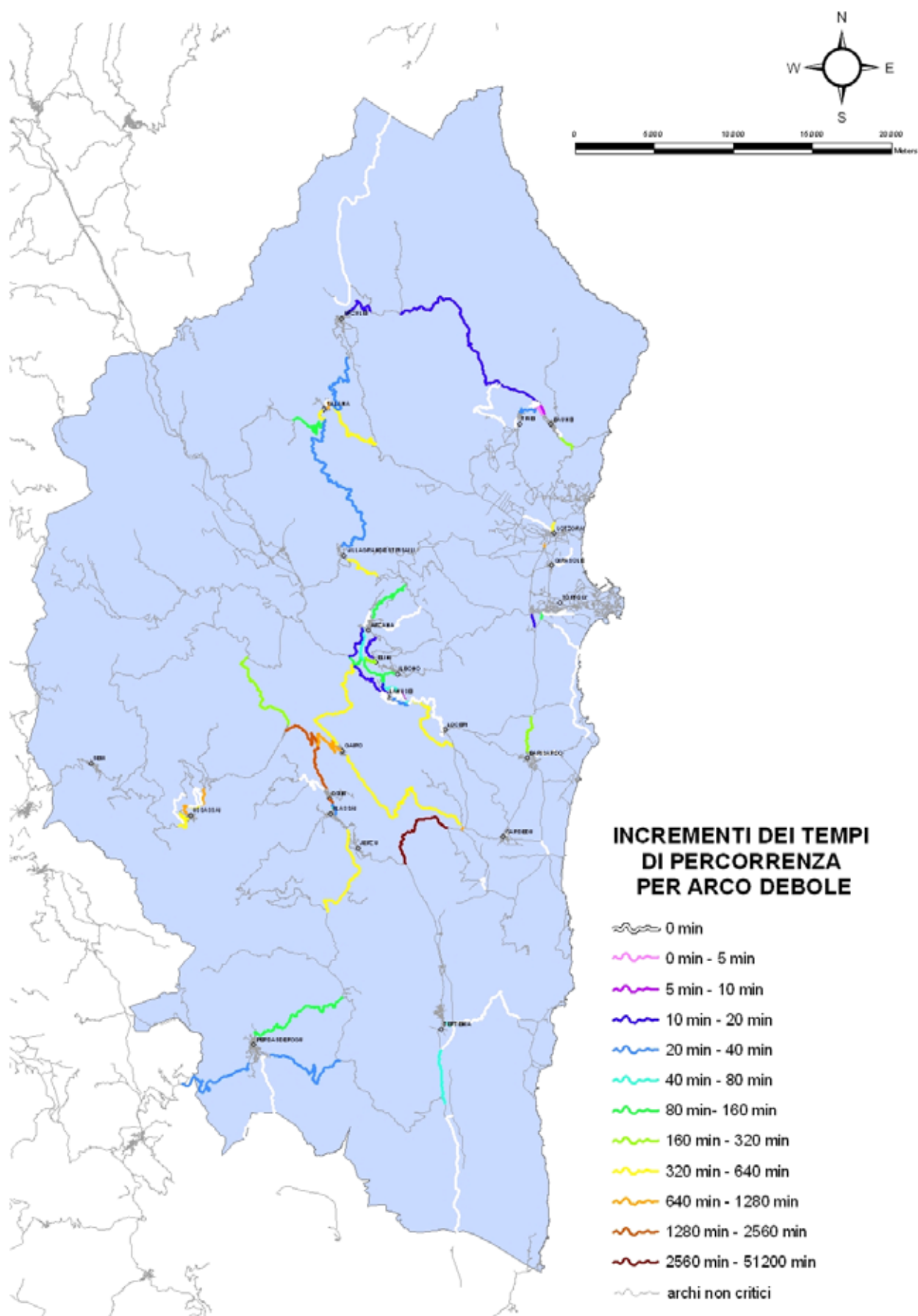


Figura 17 Vulnerabilità regionale per gli archi considerati (eq. 23).



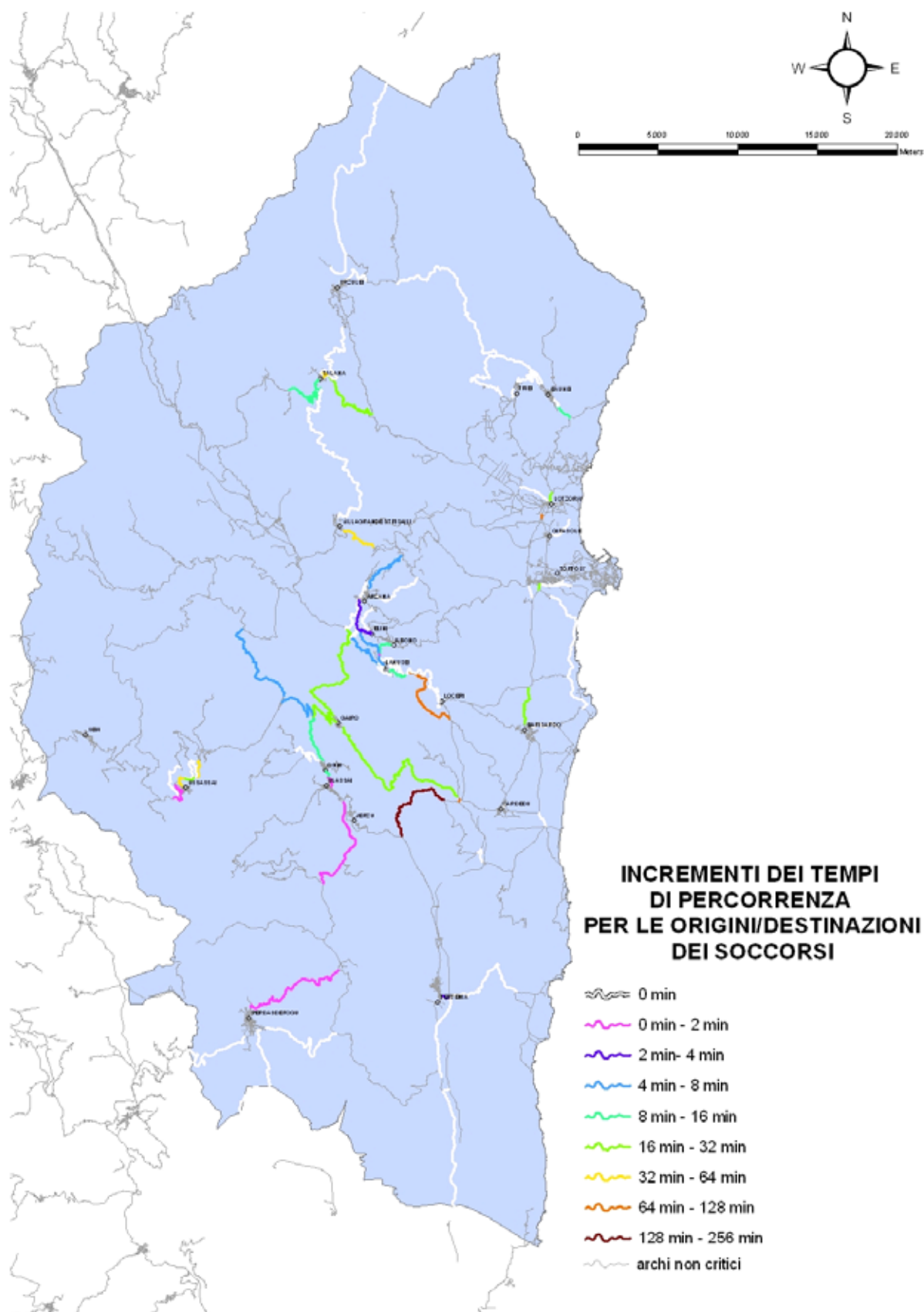


Figura 18 Indice di vulnerabilità calcolato sulle origini destinazioni dei soccorsi (eq. 24).

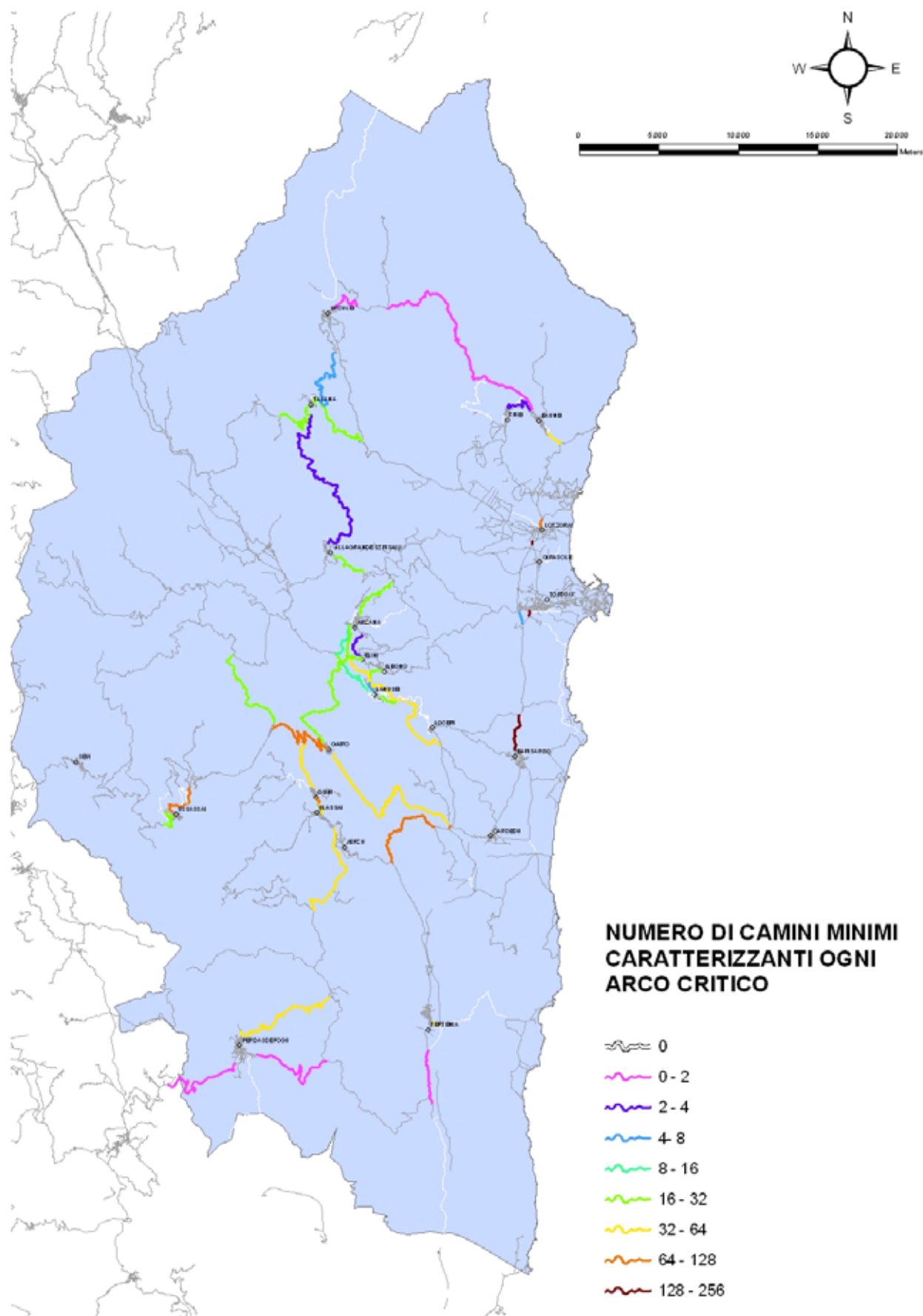


Figura 19 Numero di percorsi interessati dalla chiusura dell'arco (eq. 25).

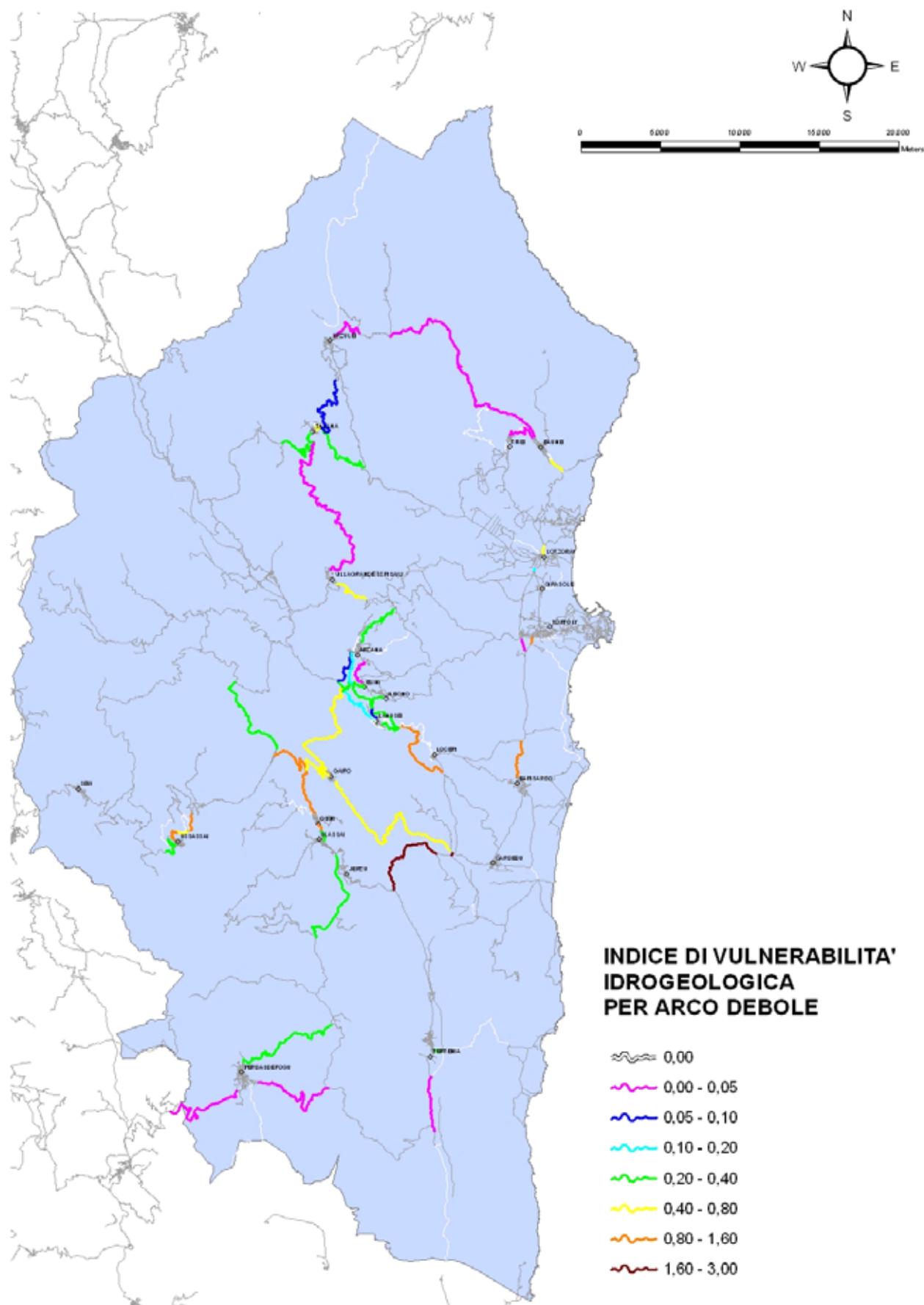


Figura 20 Indice totale di vulnerabilità per arco (eq. 33)

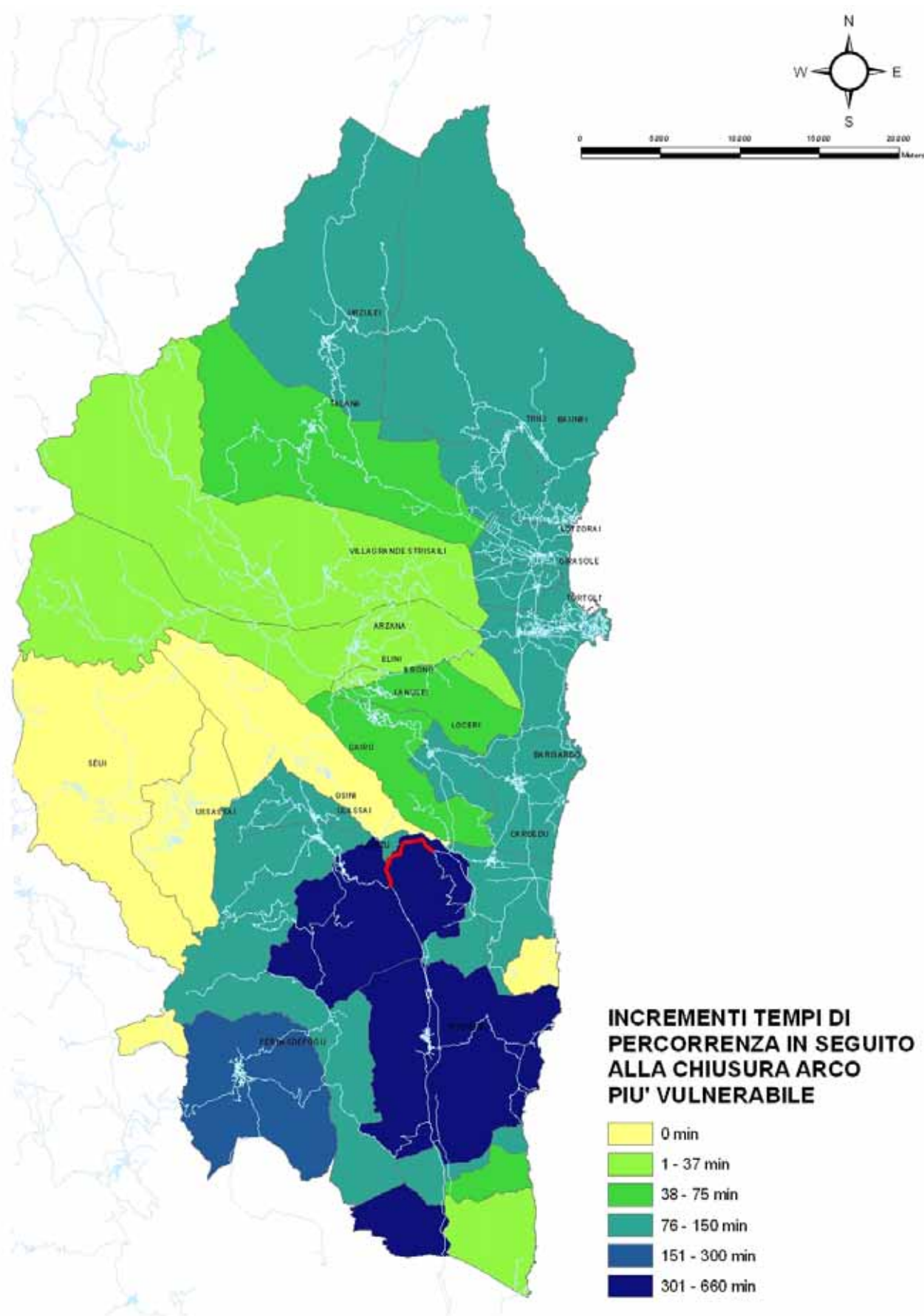


Figura 21 Conseguenze dovute alla chiusura dell'arco più vulnerabile della rete.



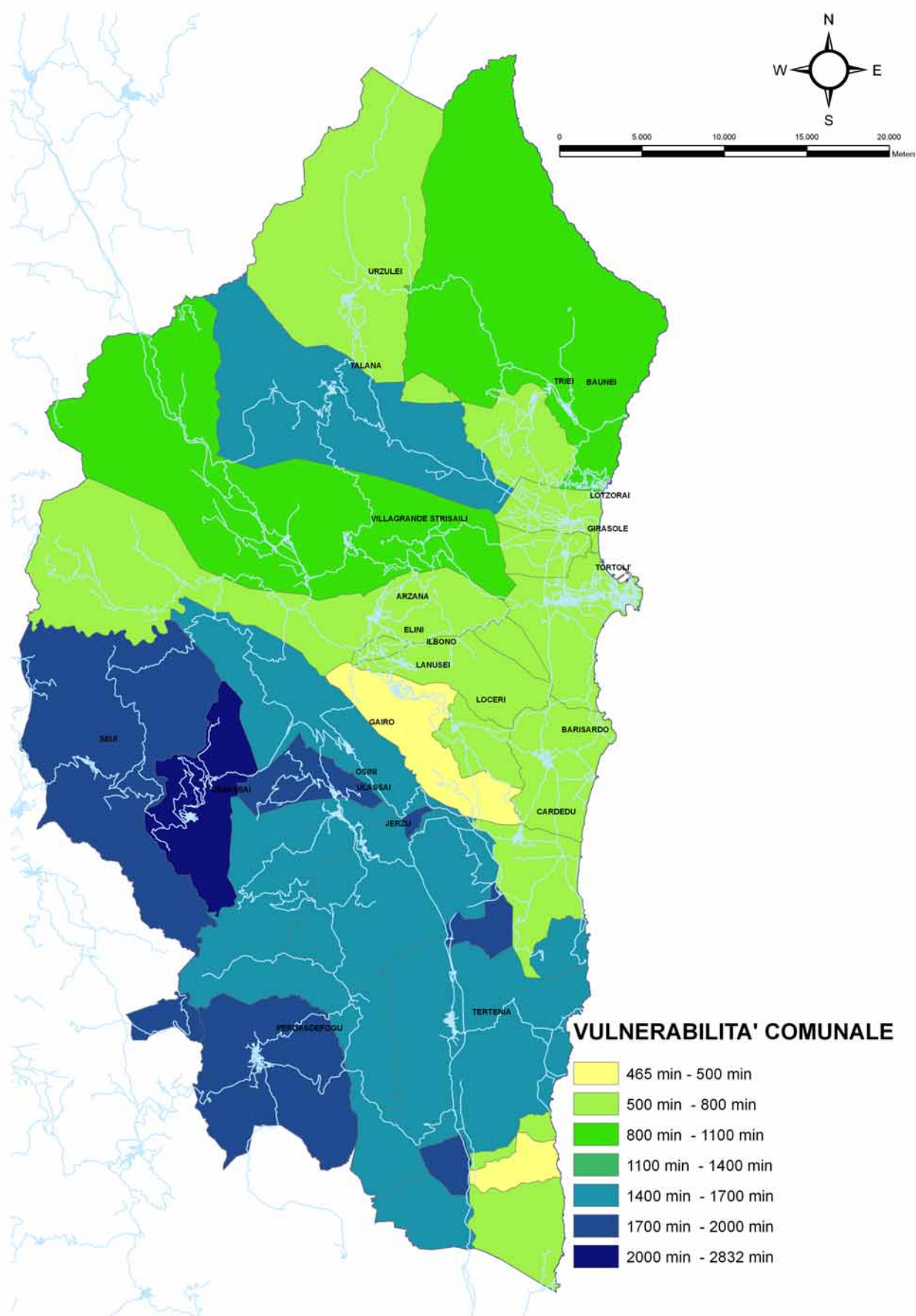


Figura 22 Vulnerabilità dei singoli comuni (eq.34).

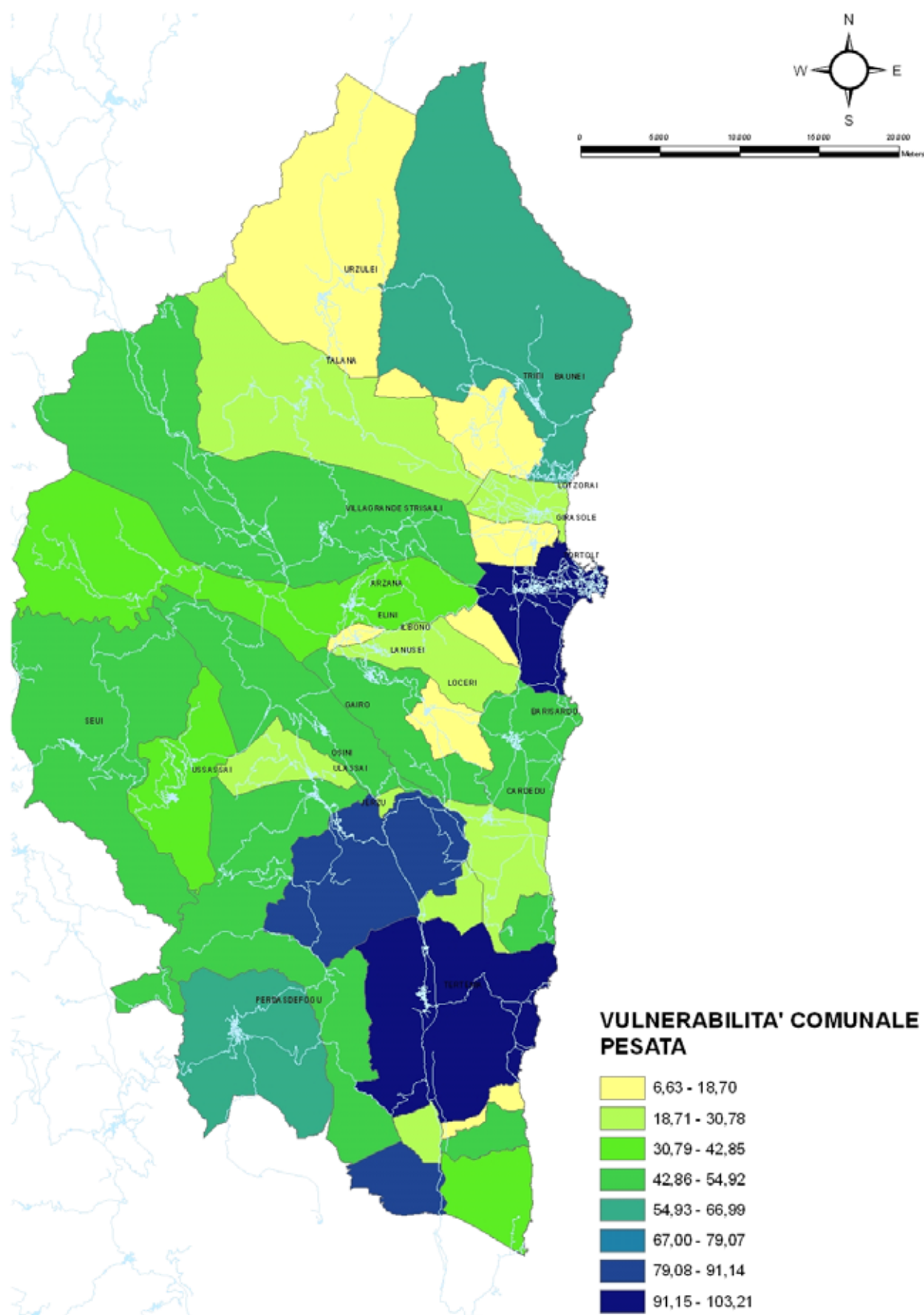


Figura 23 Vulnerabilità comunale pesata in base alla popolazione residente (eq.35).

#### **4.3. CONFRONTO CON ALCUNI INDICI PRESENTI IN LETTERATURA**

Si è più volte ripetuto, nei capitoli precedenti, come le misure di vulnerabilità proposte rispondano all'esigenza di considerare la rete stradale e gli interventi su quest'ultima secondo un approccio obbiettivo. In altre parole la misura di vulnerabilità proposta non tiene conto degli spostamenti interessanti l'arco stradale; anche per questa ragione si differenzia dalle altre trovate in letteratura, le quali, del resto, non tengono in considerazione la localizzazione dei soccorsi e i percorsi utilizzati da questi ultimi. Per questa ragione si è ritenuto necessario realizzare un confronto tra la misura di vulnerabilità proposta e le altre riscontrate in letteratura.

La scelta delle misure proposte da altri autori si è basata sul fatto che queste considerassero approcci e assunzioni iniziali simili a quelle poste alla base dello studio, e in particolare:

- si tratta di indici di vulnerabilità calcolati per gli archi di una rete stradale, dove per arco si intende un tronco stradale compreso tra due successive intersezioni;
- l'evento critico viene inteso come un incidente che realizzi la chiusura completa dell'arco;
- i percorsi ottimali in caso di chiusura dell'arco sono quelli che minimizzano il tempo di trasporto;
- i percorsi minimi sono indipendenti dal grado di carico della rete, e le misure proposte vengono applicate in particolare su reti stradali caratterizzate da flussi di traffico esigui.

In base a tali assunzioni le altre misure di vulnerabilità che sono state prese in considerazione per essere confrontate con quella elaborata durante il dottorato sono state quelle proposte da Taylor [59], da Jenelius [35] [36] e da Chang [17]. Per tali indici in un primo momento si è provveduto a mettere in evidenza similitudini e differenze in relazione alla misura proposta, in seguito sono stati applicati sulla rete della provincia d'Ogliastra e confrontati con l'indice di vulnerabilità proposto.

L'indice proposto da Taylor è rappresentato nell'equazione 4 in essa si nota come la vulnerabilità di un arco  $k$  è direttamente proporzionale agli incrementi dei tempi di percorrenza causati dalla sua chiusura tra un nodo  $i$  e un nodo  $j$  e agli spostamenti relativi.

Un'evoluzione della formula proposta da Taylor è quella presente nei lavori di Jenelius e al. [35] [36]. Le differenze che possono essere messe in evidenza con l'indice proposto nel presente lavoro sono relative alla modalità di calcolo dei tempi di percorrenza, alla scelta dell'algoritmo per il calcolo dei camini minimi e l'uso del valore del TGM relativo a ogni tronco stradale per il calcolo dell'indice di vulnerabilità. Infatti il tempo relativo a ciascun arco della rete è ottenuto dividendo la lunghezza del collegamento per la velocità di flusso libero, dedotta dalla "volume delay function". Inoltre è stato utilizzato l'algoritmo "Dijkstra" per la ricerca dei percorsi minimi. Si ricorda inoltre che le misure proposte da Jenelius sono applicate nel lavoro di quest'ultimo su tutti gli archi della rete, indipendentemente dalla loro esposizione al rischio.

Per poter adattare la misura proposta da Jenelius al caso specifico utilizzato nel presente studio sono state fatte alcune semplificazioni, e in particolare la formula utilizzata è la seguente:

$$\text{Vulnerabilità}_{\text{Jenelius}}(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}}$$

Eq. 36

dove:

- $k$  è l'arco di cui si valuta la vulnerabilità, ovvero un arco debole in cui è alta la pericolosità al rischio frane o piene;
- $w_{ij}$  sono gli spostamenti tra il comune  $i$  e il comune  $j$
- $(c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})$  è la differenza di tempo nel collegamento tra  $i$  e  $j$  quando l'arco  $k$  è interrotto, e nella situazione indisturbata.

In sostanza l'indice utilizzato per il confronto non differisce da quello originario (eq. 7) se non nel fatto che esso viene applicato solo su una parte della rete, che si utilizzano gli spostamenti anziché il valore del TGM, e che per il suo calcolo è stato utilizzato un altro algoritmo per la ricerca dei percorsi ottimali. Utilizzando gli spostamenti anziché il valore del TGM inoltre, la formula di Jenelius risulta del tutto simile a quella proposta da Taylor [59]: per questa ragione l'indice di Taylor non è stato calcolato.



L'indice di vulnerabilità proposto da Sohn [56] valuta l'importanza di un arco in termini di differenza di accessibilità tra tutti i nodi della rete in caso di chiusura di un arco (eq. 14). In particolare l'accessibilità di un comune è data dalla formula 13. Le similitudini ravvisabili tra il lavoro di Sohn e le misure proposte nel presente studio consistono nell'assunzione di ipotesi di base simili, e nell'uso di Arcview Network Analyst per il calcolo dei percorsi minimi. Le differenze invece sono riscontrabili nell'uso di un indicatore che differenzia i diversi comuni e anche i diversi archi in base alla popolazione residente e ai flussi di traffico. Inoltre l'indice è basato non sulle differenze in termini di tempi di percorrenza, ma sulle differenze in termini di aumento delle distanze.

Per l'applicazione dell'indice elaborato da Sohn al caso di studio si sono rese necessarie alcune semplificazioni:

- $a$ , lo scalare utilizzato come peso è stato posto pari a 1, in questo modo non si tiene conto del contributo alla vulnerabilità dato dai flussi di traffico;
- è stata utilizzata la differenza dei tempi di percorrenza tra un comune  $i$  e un comune  $j$ , anziché la differenza delle distanze.

In sostanza la formula semplificata di vulnerabilità di Sohn è la seguente:

$$\text{vulnerabilità}_{\text{Sohn}}^k = \sum_{i=1}^{23} A_i - \sum_{i=1}^{23} A_i^k = \sum_{i=1}^{23} (A_i - A_i^k)$$

Eq. 37

dove:

- $k$  è l'arco interrotto di cui si valuta l'indice di vulnerabilità;
- 23 sono i comuni ricadenti all'interno della provincia d'Ogliastra;
- $A$  è l'accessibilità al comune  $i$  nella condizione indisturbata e in caso di arco  $k$  interrotto.

L'accessibilità  $A_i$  utilizzata per il confronto deriva sempre da una semplificazione della misura proposta da Sohn, e in particolare:

$$A_i = \left[ \frac{P_i}{\sum_{K=1}^{24} P_K} \sum_{j=1}^{23} \left( \frac{P_j}{\sum_{k=1}^{24} P_k} \frac{t_{ij}}{\sum_{K=1}^{24} t_{ij}^*} \right) \right]$$

Eq. 38

dove:

- $A_i$  è l'indice di accessibilità per il comune  $i$ ;
- $p_i$  è la popolazione residente nel comune  $i$ ;
- $p_j$  è la popolazione residente nel comune  $j$ ;
- $t_{ij}$  rappresenta il tempo di percorrenza minimo tra il comuni  $i$  e il comune  $j$  a seguito di un determinato scenario (arco  $k$  interrotto);
- $t_{ij}^*$  rappresenta il tempo minimo iniziale tra  $i$  e  $j$ .

Una volta individuate le misure semplificate di confronto si è proceduto al calcolo degli indici. In particolare gli spostamenti utilizzati nell'equazione 36 sono quelli pendolari censiti dall'ISTAT nel 2001 e relativi a spostamenti per motivi di studio e lavoro, effettuati con ogni mezzo di trasporto. La popolazione residente è sempre quella censita dall'ISTAT nel 2001.

La figura 24 rappresenta i valori dell'indice di vulnerabilità di Jenelius per gli archi deboli. Anche in questo caso l'arco più vulnerabile è quello localizzato lungo la S.S. n°125 tra l'abitato di Jerzu e il comune di Cardedu. Gli altri archi vulnerabili sono localizzati soprattutto lungo la S.S. n°125 lungo percorsi che collegano i comuni a Tortoli, e sempre lungo tronchi stradali in prossimità dell'abitato di Lanusei.

La figura 25 mette invece in evidenza i risultati del calcolo dell'indice di Sohn sempre per gli archi deboli considerati. In questo caso possono essere sostanzialmente ripetute le osservazioni precedenti sull'indice di Jenelius. Questo risultato in qualche modo poteva essere prevedibile, in quanto è chiaro che gli spostamenti pendolari sono legati alla popolazione residente comunale.

Infine sono stati confrontati i risultati ottenuti per i tre indici. Se si confrontano i primi dieci archi più vulnerabili, calcolati secondo i tre diversi indicatori, possono essere rilevate alcune differenze. In particolare, alcuni archi che risultano molto vulnerabili secondo l'indice realizzato con questo studio, non lo sono se si utilizzano gli altri due indicatori, si tratta principalmente di archi periferici, localizzati ad esempio lungo la S.S. n°198, nella parte più interna della provincia, tali tronchi stradali sono caratterizzati senza dubbio da caratteristiche progettuali e geometriche critiche, e in alcuni casi dall'assenza di alternative di percorso. Tuttavia, sempre tali archi, risultano

al servizio di pochi centri urbani e di piccole dimensioni, per cui assumono un'importanza minore se si tiene conto degli spostamenti o della popolazione residente. Se invece si analizzano i primi 20 archi vulnerabili, calcolati secondo i tre differenti indici, in questo caso si rileva una maggiore convergenza dei risultati. Il grafico 3 mette a confronto per ogni barriera (e quindi per ogni arco debole) i tre indici di vulnerabilità, precedentemente normalizzati e moltiplicati per 100. Più che i valori assoluti dei tre indicatori, può essere interessante rilevare le differenze tra questi ultimi. In particolare si rileva come l'indice di vulnerabilità elaborato nel presente lavoro risulti più elevato degli altri due presi a confronto in collegamenti periferici della provincia, che non possiedono agevoli alternative di percorso e la cui possibile chiusura costringerebbe all'isolamento alcuni comuni. Ciò accade lungo la S.S. n°198 all'altezza dell'abitato di Ussassai, o per alcune strade che costeggiano la valle del rio Pardu, come la S.S. n°198, la S.P. N°11 e la S.P. n°28, soprattutto in questo caso, a causa dell'orografia della zona si riscontra un'inesistenza di percorsi alternativi. Differenze elevate tra i tre indicatori si rilevano anche lungo la S.S. n°125 tra l'abitato di Barisardo e il capoluogo di Tortolì, in questo caso pesa sull'indice di vulnerabilità la centralità rivestita dall'arco, che risulta cruciale per il collegamento dei diversi comuni costieri, e di quelli del centro sud con la costa.

Al contrario i tronchi stradali che presentano un maggiore indice elaborato con la formula di Jenelius [35] [36] risultano soprattutto quelli più interessati dai collegamenti pendolari per il raggiungimento dei due capoluoghi di provincia di Lanusei e Tortolì, e in particolare, la S.S. n°125 nel tratto tra Baunei e Lotzorai e Lotzorai e Tortolì. La S.S. n°198 tra Lanusei e Ilbono e la Strada Provinciale che collega Lanusei alla S.S. n°125 all'altezza del Ponte S. Paolo. I risultati dei tre indici convergono per quanto riguarda gli archi più vulnerabili come la S.S. n°125 nel collegamento Jerzu Cardedu.

È chiaro come in un'ottica di individuazione delle priorità nella realizzazione di interventi di adeguamento e/o manutenzione per attenuare la vulnerabilità della rete, i risultati svolti secondo analisi che utilizzano i diversi indicatori offrono approcci diversi. Pur convergendo nel caso dell'arco più vulnerabile, decidere le priorità utilizzando l'approccio proposto da Jenelius o da Sohn significherebbe localizzare le risorse lungo quelle strade a servizio dei collegamenti tra comuni e capoluoghi di provincia, e in prossimità di questi ultimi. D'altro canto utilizzare l'indicatore proposto nel presente studio permette di intervenire lungo strade che collegano i comuni che già

risentono di condizioni di isolamento e le cui conseguenze sono ben evidenti (decremento della popolazione, disoccupazione, etc.).

La metodologia e l'indice elaborato nella tesi offrono una valida alternativa e un punto di vista differente rispetto agli approcci usuali. Quale sia la priorità da dare agli interventi di adeguamento della rete è una decisione del tutto politica basata soprattutto sugli obiettivi che questa si pone. In linea generale può essere adottato un approccio mirato all'efficienza dell'intervento o alla massima obiettività dello stesso. Se per approccio efficiente si intende la realizzazione di interventi a vantaggio di più utenti è chiaro come gli indici elaborati da Sohn e Jenelius risultano maggiormente rispondenti. D'altro canto, se si intende dare maggiore priorità alle comunità più periferiche della regione, che già risentono di carenze di accessibilità e non possiedono valide alternative di percorso. Allora, in questo caso, è preferibile utilizzare la metodologia e l'indice elaborato in questa tesi.

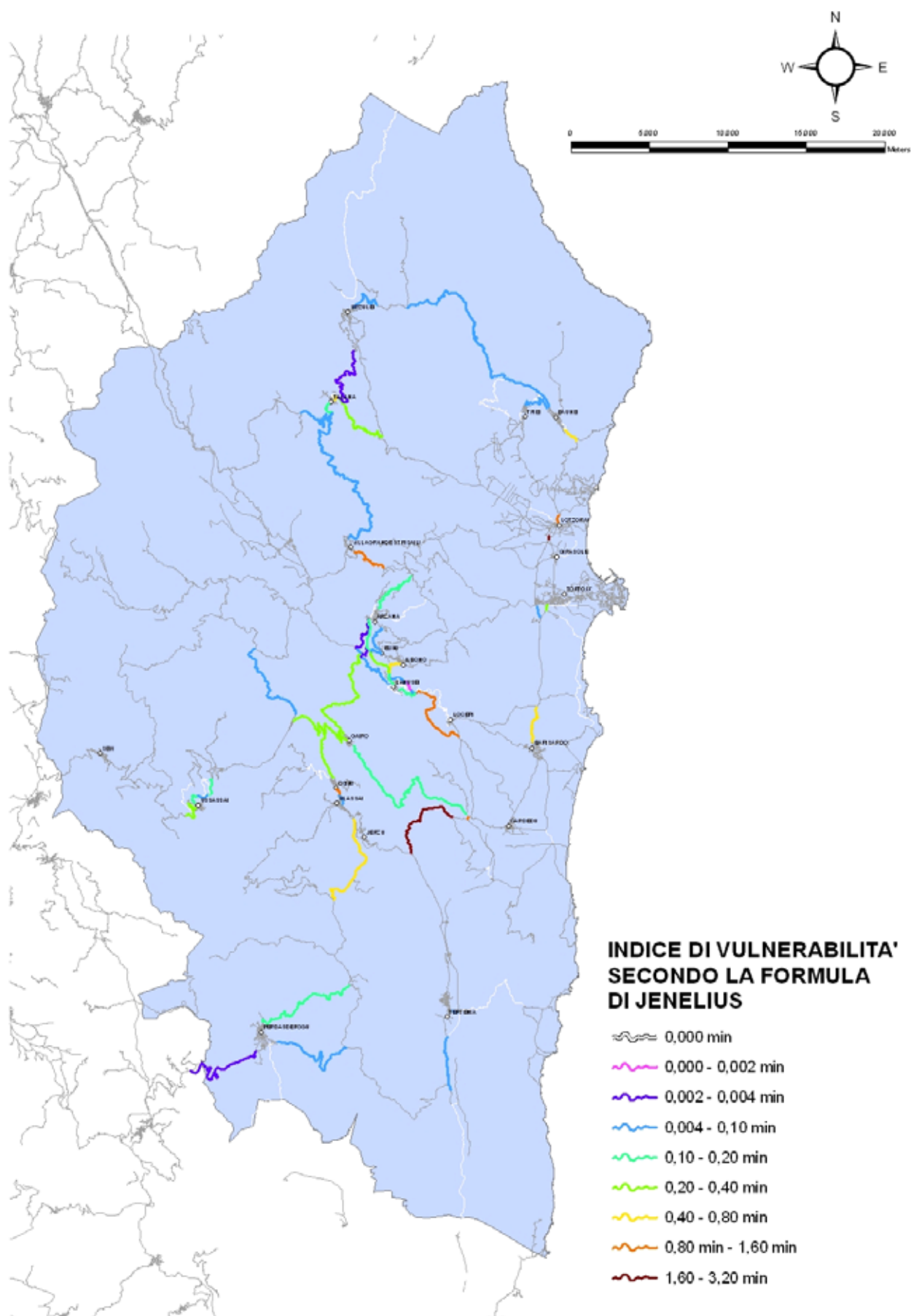


Figura 24 Indice di Jenelius per arco critico (eq. 36).

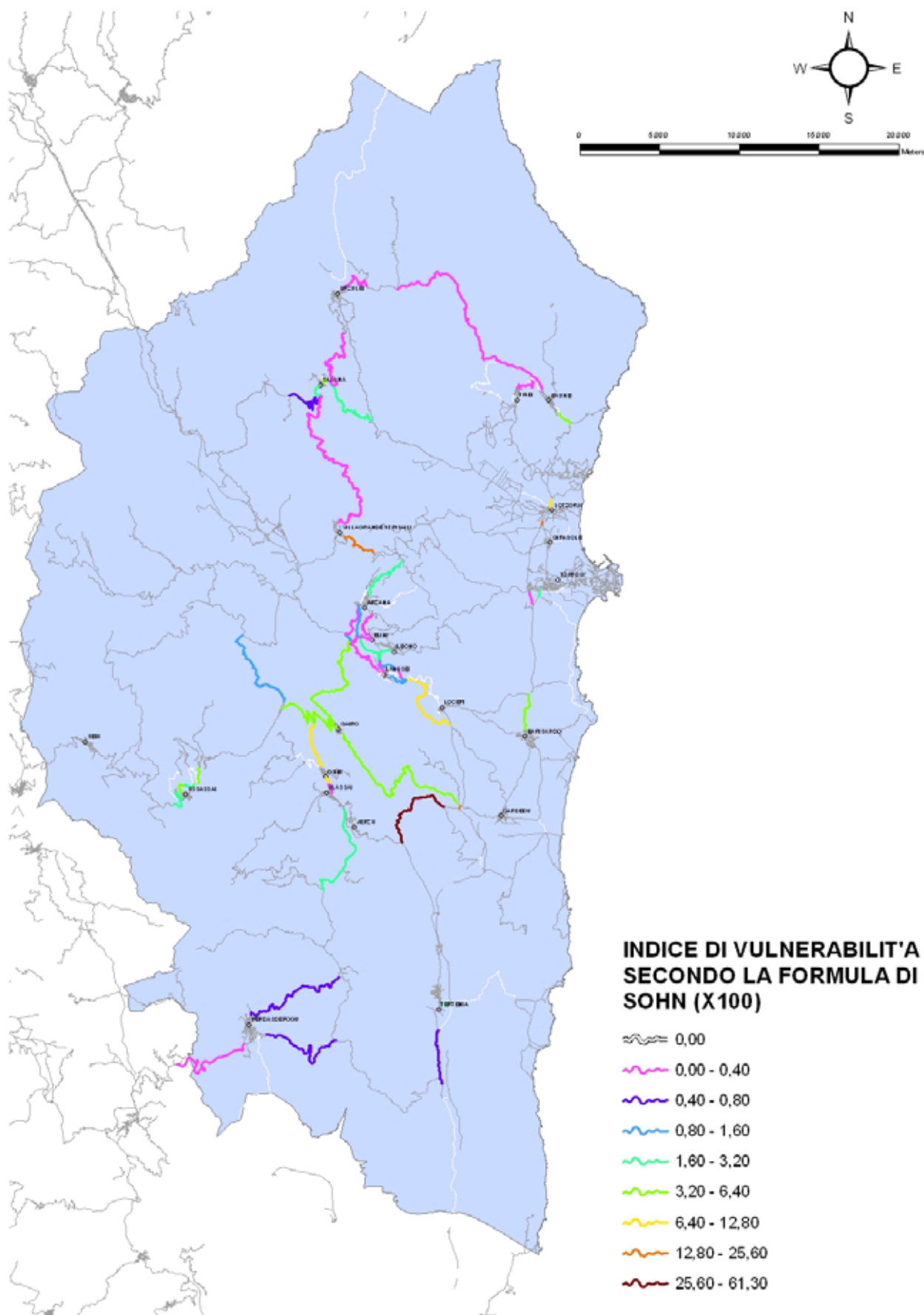


Figura 25 Indice di Sohn per arco critico (eq. 37).

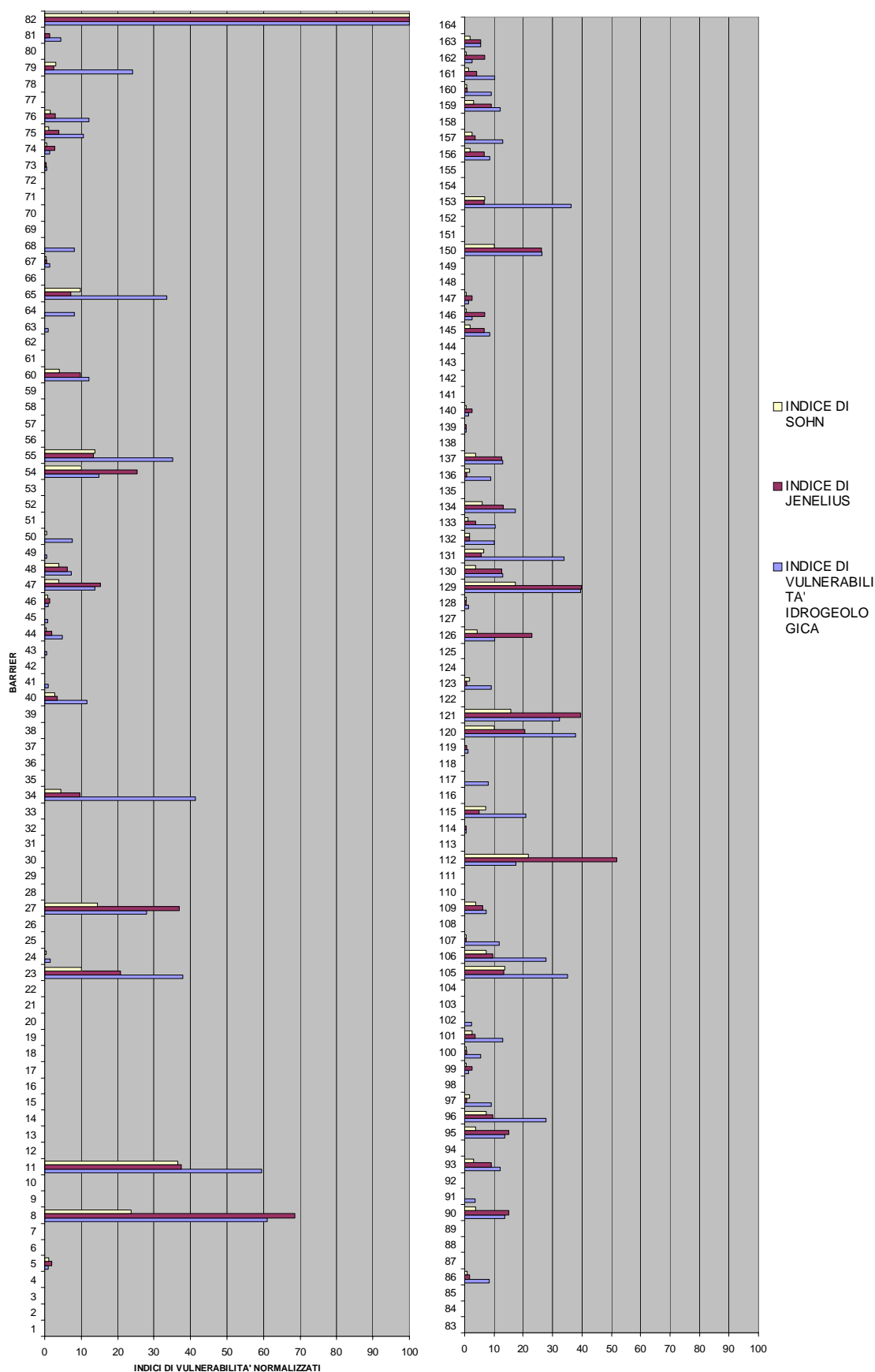


Grafico 4 Confronto tra i tre indici di vulnerabilità normalizzati (x100)

## 5. RICERCHE FUTURE

Il lavoro ha considerato l'identificazione di un nuovo indicatore per la valutazione della vulnerabilità all'interno di una rete stradale e con particolare riferimento agli eventi di natura idrogeologica. Sinteticamente tale indicatore è costruito prendendo come base la differenza dei tempi di percorrenza lungo un cammino minimo tra un polo e un altro quando l'arco in esame è interrotto. Inoltre i tempi di percorrenza degli archi sono stati valutati considerando le sole caratteristiche planimetriche progettuali della strada.

Nella definizione della metodologia, degli indicatori, nonché nella scelta degli strumenti utilizzati per il calcolo potrebbero essere ravvisabili alcuni limiti.

Per quanto riguarda le misure di vulnerabilità proposte, queste non considerano nella loro formulazione né il flussi di traffico che caratterizzano i singoli tronchi, né la popolazione potenzialmente coinvolta dalla chiusura dell'arco, né gli spostamenti impediti. Tale omissione corrisponde come già specificato alla volontà di utilizzare un approccio maggiormente equo nell'analisi, che consideri tutti gli archi costituenti la rete ugualmente importanti.

Per quanto riguarda l'approccio metodologico proposto si è assunto che l'indicatore di vulnerabilità venisse calcolato su quegli archi che studi del settore avessero dimostrato essere esposti a pericolosità e quindi a una potenziale chiusura. L'accuratezza nell'identificazione degli archi deboli dipenderà quindi dall'accuratezza degli stessi studi di settore, questo tuttavia non limita la validità delle misure e della metodologia proposte, in quanto è chiaro come esse possano essere comunque applicabili qualora venissero raffinati gli studi specifici. Inoltre le misure proposte possono a priori essere utilizzate per qualsiasi arco della rete, a prescindere dalla sua pericolosità (debolezza), i valori così ottenuti rappresentano tuttavia, per la definizione assunta, una misura dell'importanza dell'arco piuttosto che della sua vulnerabilità.

Un'altra assunzione dell'approccio proposto è che l'arco critico venisse considerato completamente chiuso e non venisse stimato il tempo di chiusura dello stesso. In realtà è più probabile che un evento critico possa interessare marginalmente un collegamento stradale, e determinarne per esempio la sua parziale chiusura. Tuttavia per riuscire a determinare il tempo di chiusura dell'arco sarebbero necessarie



approfondite analisi capaci di stimare il danno atteso, quest'ultimo risulterà funzione sia della pericolosità insistente sull'arco che delle sue caratteristiche strutturali. Tale genere di analisi è senza dubbio realizzabile per singole opere d'arte (ponti, viadotti, muri di sostegno) ma con molte difficoltà può essere estesa a un intero arco. L'approccio proposto in questo studio invece può essere considerato come inverso, ovvero in un primo momento individua quegli archi la cui chiusura implica un maggiore impatto sul territorio e lascia a un momento successivo lo studio dei singoli elementi costituenti il solido stradale.

Il fatto di considerare gli archi completamente interrotti è un presupposto necessario per supporre che un possibile utente sia forzato a trovare un percorso alternativo a quello originario che risulti il più possibile conveniente. In questo senso si assume che l'utente si comporti seguendo il "principio dell'ottimo per l'utente". Ovvero si assume che ogni singolo utente che utilizza la rete stradale di riferimento scelga il suo itinerario in modo che lo spostamento su ogni altro itinerario alternativo comporti un tempo dello spostamento o un costo, maggiore o al più uguale. Ovvero l'itinerario scelto sarà quello caratterizzato dal tempo o dal costo minore. L'approccio presentato può essere sicuramente giustificato dal fatto che l'obiettivo degli indicatori proposti è quello di offrire una misura per poter comparare i diversi archi della rete in un'ottica di gestione degli interventi (di manutenzione o adeguamento) e non propone quindi uno studio sui costi derivanti dalla chiusura dell'arco. Inoltre, nello studio non si entra nel merito delle possibilità di collegamento alternative offerte da altri modi di trasporto (ferrovie ad esempio). Ciò è dovuto al fatto che l'oggetto delle indagini di vulnerabilità è solamente la rete stradale, inoltre per la maggior parte del territorio nazionale italiano la rete stradale costituisce l'unica modalità di trasporto possibile. Quest'ultimo fatto, ad esempio, è ben rappresentato dal caso applicativo dove la rete ferroviaria risulta del tutto assente.

Può essere sottolineato come nella metodologia si consideri solamente un arco interrotto per volta, non è stata presa in considerazione la possibilità che, in seguito ad un evento particolarmente intenso, più archi stradali possano essere contemporaneamente chiusi. In questo caso valgono le considerazioni sopra esposte, ovvero la metodologia vuole offrire un ordine di priorità tra gli archi, e non uno studio sui possibili scenari di rischio. Inoltre è chiaro che le combinazioni in questo senso

potrebbero essere pressoché infinite, ed esisterà sempre uno scenario più disastroso di altri.

Altre considerazioni, possono essere fatte sulla modalità di calcolo dei tempi di percorrenza ai singoli archi, la modalità proposta, infatti, stima il tempo di percorrenza in base alle sole caratteristiche planimetriche di progetto, considerando il veicolo isolato e la velocità non influenzata dalla pendenza delle livellette. Ciò può condurre a stimare tempi di percorrenza inferiori a quelli praticati nella realtà. Tuttavia si è più volte sottolineato il fatto che le misure proposte vogliono rispecchiare una vulnerabilità dell'arco che sia anche strutturale, e quindi legata alle caratteristiche progettuali della strada. Inoltre i tempi di percorrenza non vengono considerati come valori assoluti, ma le misure di vulnerabilità risultano tutte costruite sugli incrementi dei tempi di percorrenza causati dalla chiusura di un arco. Detto in altre parole la metodologia elaborata nella tesi non si propone di valutare quale sia l'itinerario maggiormente critico in termini di tempi di percorrenza e quindi di priorità per la velocizzazione dello stesso, ma valuta le ripercussioni e l'importanza dell'arco per i collegamenti di una regione.

Per quanto riguarda l'attribuzione dei tempi di percorrenza alla rete e ai singoli archi si è visto come questa si basi su alcune assunzioni che derivano dalla Normativa Italiana (D.M. 5/11/2001). In futuro si ritiene che la determinazione di tali tempi di percorrenza possa essere ulteriormente migliorabile tenendo in considerazione altre caratteristiche progettuali, come ad esempio la pendenza delle livellette. Altre ricerche future potrebbero inoltre riguardare l'ulteriore implementazione di caratteristiche intrinseche dell'arco (caratteristiche strutturali) all'interno dell'indice elaborato, o, ancora l'applicazione della metodologia ad altre tipologie di rischio, o a più tipologie insieme.

## 6. CONCLUSIONI

Il tema dell'affidabilità e della vulnerabilità delle infrastrutture stradali in condizioni di emergenza ha acquisito, nell'ultimo periodo un'importanza sempre maggiore: è noto a tutti, infatti, il ruolo cruciale che svolgono prima, dopo e durante il verificarsi di un'emergenza. Tuttavia, in letteratura si fatica ancora a trovare studi su questo settore, e si riscontra sicuramente una varietà di approcci e di soluzioni.

La presente tesi di dottorato è la conclusione dell'attività di ricerca svolta nell'ambito del corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria del Territorio indirizzata allo sviluppo, per una rete stradale, di un indice di vulnerabilità agli eventi idrogeologici.

Nella prima parte è stata sviluppata un'analisi della bibliografia esistente: in un primo momento sono state analizzate procedure e metodologie per la valutazione del rischio sulle infrastrutture stradali, in seguito si è ulteriormente approfondito l'argomento della valutazione della vulnerabilità con riferimento alle strade. Si è messo in evidenza come il concetto di vulnerabilità non sia definito in maniera univoca, e come cambino anche le metodologie per la sua valutazione a seconda della scala di analisi e delle finalità degli studi. Alcuni spunti per ulteriori ricerche sono emersi dall'analisi bibliografica:

- la necessità di approfondire gli studi sulla vulnerabilità di una rete stradale, sviluppati solo di recente;
- l'opportunità di considerare il concetto di vulnerabilità strutturale unitamente a quello di vulnerabilità funzionale all'interno di una rete;
- l'esigenza di concentrare l'attenzione verso tipologie di rischio non ancora approfondite adeguatamente, come il rischio idrogeologico.

Nella seconda parte della tesi l'attenzione è stata rivolta allo studio di una metodologia di ricerca originale, e allo sviluppo di un indice per la valutazione della vulnerabilità caratterizzante i diversi archi di una rete stradale. Nel lavoro si è assunto che la vulnerabilità fosse data dalla concomitanza di due fattori: la debolezza di un arco e la sua importanza.

In particolare per importanza si sono intese le ripercussioni, all'interno di una regione assunta come riferimento, date dalla chiusura dell'arco. Per valutare tali

ripercussioni si è appositamente studiato un indice di vulnerabilità per gli archi di una rete. Questo indice è basato sugli incrementi dei tempi di percorrenza su una rete a seguito della chiusura dell'arco. I tempi sono calcolati considerando i cammini minimi che collegano i diversi centri urbani serviti dalla rete stradale. L'indice è dato dalla somma di tre indicatori, che tengono conto della funzione svolta dall'arco all'interno della rete, dell'importanza rivestita dall'arco per le operazioni di soccorso, da quanto l'arco è utilizzato all'interno della rete per i collegamenti tra i diversi centri, e infine dalle caratteristiche planimetriche dell'arco stesso.

Le differenze tra l'indice elaborato e gli altri presenti in letteratura derivano dal fatto che esso è stato costruito in base alle caratteristiche planimetriche della strada: ciò permette un approccio obbiettivo nella definizione della vulnerabilità, non tenendo conto delle caratteristiche di traffico della rete e della popolazione residente, e tiene conto invece delle operazioni di soccorso. Le suddette differenze di fatto costituiscono anche l'originalità della misura studiata. Inoltre l'indice di vulnerabilità risponde agli obiettivi che sono stati posti alla base della ricerca, ovvero permette agli Enti proprietari e gestori una possibile definizione di priorità per interventi di adeguamento o interventi di manutenzione ordinaria o straordinaria. La metodologia, inoltre, può essere utilizzata o integrata all'interno degli strumenti di pianificazione della Protezione Civile, e può inoltre rappresentare uno strumento a supporto delle decisioni in ambito di pianificazione, ad esempio quando si vada ad elaborare un progetto di riassetto della rete.

Nell'ultima parte del lavoro la metodologia elaborata e l'indice proposto sono stati applicati ad un caso reale: la rete stradale delle provincia d'Ogliastra, in Sardegna. In seguito alla costruzione della rete e dell'attribuzione dei tempi di percorrenza a ciascun arco, si è sviluppata una procedura iterativa sul GIS, che mediante l'utilizzo dell'applicativo Network Analyst, ha permesso l'identificazione degli archi più vulnerabili della rete e la realizzazione di una mappa della vulnerabilità della stessa. Infine è stato svolto un confronto con altri due indici dedotti dalla bibliografia per la valutazione della vulnerabilità. Si è messo in evidenza come i risultati secondo i tre indici convergano nel caso dell'arco più vulnerabile, ma come l'indice elaborato all'interno della tesi permetta una valutazione più obiettiva della rete e in particolare attribuisca maggiore importanza ad itinerari periferici, particolarmente critici per

l'assenza di alternative di tracciato e per le condizioni di forte isolamento date dalla loro chiusura.

Si ritiene perciò che la metodologia e gli indicatori risultati dall'attività di ricerca possano rappresentare uno strumento valido e affidabile a supporto delle decisioni sia degli Enti gestori, che della Protezione Civile. Avendo come risultato la realizzazione di una mappa della vulnerabilità della rete stradale definisce in maniera implicita possibili priorità di intervento, è inoltre uno strumento che adeguatamente utilizzato permetterebbe una gestione dei rischi sulle strade. La metodologia, infatti, seppur studiata specificatamente per il rischio idrogeologico, può essere applicata anche per altre tipologie di rischio (rischio incendi, Hazmat, ecc.)

Il metodo potrebbe essere ulteriormente sviluppato ed affinato in successive ricerche, per esempio, approfondendo ulteriormente la modalità di attribuzione dei tempi di percorrenza agli archi stradali, o integrando altre caratteristiche strutturali nella definizione dell'indice di vulnerabilità.

Una volta identificato dove la rete è vulnerabile il passo successivo è quello di indicare le possibili soluzioni o alternative di intervento per ridurre la vulnerabilità dell'arco. In questo senso si può distinguere tra interventi e misure di sicurezza attiva e interventi e misure di sicurezza passiva. Le prime tendono a ridurre la probabilità che l'evento si verifichi, le seconde tendono invece a mitigarne le conseguenze, non agiscono quindi sull'evento. A titolo di esempio, alcune misure di sicurezza attiva che possono essere applicate sono:

- ridurre la probabilità di accadimento dell'evento e migliorare conseguentemente l'affidabilità del collegamento. Ciò può essere fatto intervenendo sull'infrastruttura stradale (ad esempio mediante la ricostruzione delle opere d'arte considerate vulnerabili), o ancora intervenendo sull'ambiente circostante per ridurre l'entità dell'evento (realizzazione di interventi di stabilizzazione dei versanti, riduzione delle portate di piena di un bacino, etc);
- concentrare l'attenzione su itinerari alternativi e migliorarli mediante interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria. Questo in particolare può essere fatto quando un arco critico possiede un' alternativa valida di percorso. L'attenzione in questo caso va rivolta alla viabilità esistente, la quale, seppure con livelli di servizio inferiori è capace di poter mantenere le comunicazioni;

- intervenire sulla configurazione della rete per migliorarne la sua affidabilità. Ciò può essere fatto aggiungendo un nuovo collegamento: un' alternativa di tracciato all'arco vulnerabile. Questa soluzione risulta chiaramente la più costosa, essa dovrebbe essere applicabile solamente dopo un'attenta valutazione dei costi e dei benefici (ad esempio, attraverso l'applicazione di un'analisi multicriteria), e applicata solo per quegli archi che non possiedono altre alternative di tracciato.

Azioni e interventi di sicurezza passiva possono essere:

- realizzare periodici interventi di manutenzione straordinaria, volti al controllo del collegamento considerato;
- mettere in atto strumenti di allerta, monitoraggio e controllo che in caso di chiusura dell'arco o di possibile interruzione del collegamento, possano avvisare gli utenti in tempo reale e indirizzare verso alternative di percorso;
- predisporre modi e mezzi di trasporto alternativi da utilizzare durante l'emergenza in attesa del ripristino del collegamento stradale.

## **APPENDICE: CHECK LIST PER LA VALUTAZIONE SPEDITIVA DELLA VULNERABILITÀ IDROGEOLOGICA LUNGO TRINCEE E RILEVATI**

Dall'analisi bibliografica esposta nei capitoli precedenti è emerso come esistano diverse definizioni di vulnerabilità (strutturale, funzionale, vulnerabilità di un nodo della rete, etc.) e come le modalità per studiarle possono essere suddivise in due categorie: analisi qualitative e analisi quantitative.

La metodologia e l'indice di vulnerabilità messo a punto all'interno della tesi di dottorato vale per gli archi facenti parte di una rete stradale, e viene calcolata per quegli archi definiti "deboli" dove per debolezza si intende l'esposizione al rischio frane e piene elevato o molto elevato. L'individuazione di tali archi deboli può essere fatta o attraverso l'impiego di carte del rischio già elaborate per il territorio, o mediante analisi più specifiche localizzate lungo tronchi stradali, tese a identificare la vulnerabilità strutturale del tronco. È chiaro come un'analisi di tale tipo risulta comunque più lunga e sicuramente più dispendiosa. Un'alternativa in questo senso può avvenire mediante l'impiego di check list.

L'utilizzo che può essere fatto delle check list, in riferimento alla metodologia messa a punto nel lavoro di tesi può riguardare due momenti specifici:

- per l'identificazione degli archi deboli all'interno della rete su cui andare successivamente ad applicare la metodologia e calcolare l'indice di vulnerabilità;
- a seguito dell'individuazione degli archi deboli, per approfondire lo studio di vulnerabilità tenendo conto delle caratteristiche strutturali dell'arco e offrire un eventuale ulteriore indice di priorità tra i diversi tronchi critici.

In letteratura, si è detto, possono essere trovati alcuni esempi di check list; tuttavia queste risultano studiate solamente per il rischio sismico. Si è perciò pensato di analizzare delle check list specificatamente studiate per il rischio idrogeologico (frane e piene). Per la loro realizzazione sono stati seguiti i seguenti passi:

1. le schede sono state realizzate per i tratti in trincea e per i tratti in rilevato; non sono state realizzate nello specifico per ponti, viadotti e gallerie, in quanto tali

problematiche riguardano nello specifico il campo dell'ingegneria strutturale nel primo caso, e della geologia e della geotecnica nel secondo;

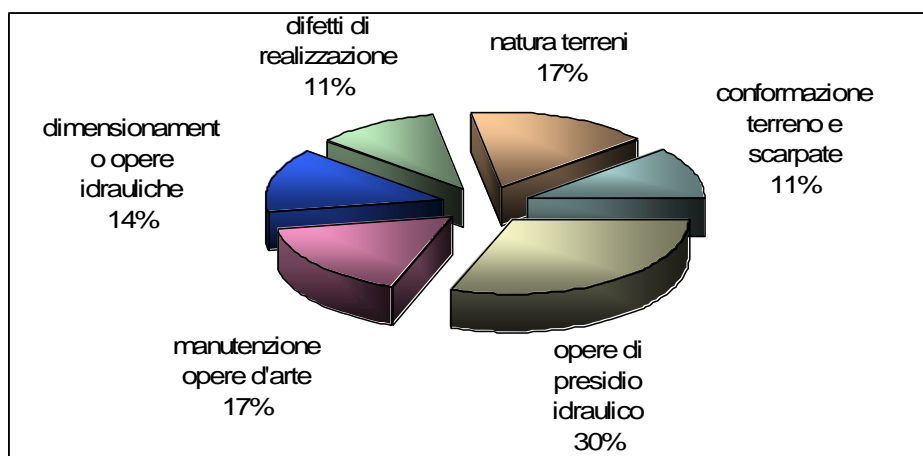
2. per quanto attiene le opere idrauliche si è ritenuto di inglobare la loro analisi all'interno delle due schede proposte, limitandone la verifica alla loro presenza o assenza, e al loro stato di manutenzione. Infatti, per una analisi puntuale delle stesse sarebbe necessario eseguire calcoli di verifica del dimensionamento dopo aver realizzato i necessari rilievi delle caratteristiche geometriche dell'opera, e le analisi sui bacini imbriferi su cui insiste l'opera;
3. sono stati raccolti e analizzati diversi casi di instabilità del solido stradale verificatisi in passato in Sardegna;
4. è stata analizzata la bibliografia specifica del settore;
5. sono state realizzate le check list per i rilevati e le trincee.

Volendo arrivare alla definizione di liste di valutazione che permettessero un'analisi speditiva di vulnerabilità di un tronco stradale, come primo passo è stata analizzata una casistica di instabilità che hanno colpito in passato alcune strade della Sardegna. Una prima difficoltà che si è riscontrata è una scarsa documentazione su eventi di tale tipo, sia di tipo fotografico che di tipo descrittivo. La documentazione raccolta in particolare è stata fornita dall'ANAS e si tratta solamente di fotografie. Perciò, in base anche alle testimonianze dei tecnici che sono intervenuti per i diversi eventi, per ogni caso sono state specificate le diverse cause, direttamente ascrivibili alla progettazione o alla realizzazione del solido stradale che potessero aver indotto il fenomeno di instabilità, o eventualmente aumentato il danno relativo. Cause specifiche sono poi state raggruppate in macrocause.

I risultati di tale analisi sono rappresentati nel grafico 5. La mancanza di opere idrauliche per la difesa del corpo stradale costituisce la causa percentualmente maggiore di instabilità rilevate (30%). Questo risultato era in qualche modo prevedibile, dal momento che è nota l'importanza della presenza delle opere di regimazione idraulica delle acque. Le acque infatti (sotterranee o superficiali) possono provocare ingenti danni a una infrastruttura stradale, sia modificando le caratteristiche meccaniche del terreno, sia erodendo lo stesso e predisponendo a successivi crolli e scoscendimenti delle scarpate. Rientrano nelle opere di presidio idraulico la presenza di opportuni drenaggi, di cunette, fossi di guardia, difese di sponda e la protezione delle scarpate.



Il 17% di instabilità interessanti la sede stradale sono dovute alla natura dei terreni, soprattutto di fondazione e alla manutenzione delle opere d'arte. Le raccomandazioni progettuali suggeriscono sempre di evitare l'attraversamento di terreni con instabilità in atto o potenziali, e con caratteristiche geotecniche incerte. Tali raccomandazioni spesso non sono seguite. Ad esempio nella figura 26 si mostra il cedimento del rilevato della S.S. n°198, in prossimità dell'abitato di Gairo, la strada attraversa terreni in passato già interessati da diversi fenomeni franosi, e particolarmente critica a causa della morfologia e della geologia della zona.



**Grafico 5 Cause di danneggiamenti alle strade in seguito ad un evento di natura idrogeologica**



**Figura 26 Cedimento della sede stradale lungo la S.S. n° 198.**

Il 14% di fenomeni di instabilità analizzati è dovuto a un errato dimensionamento delle opere idrauliche. È questo il caso della S.S. n°389 (fig. 27), interessata nel dicembre del 2004 da una serie di precipitazioni particolarmente intense. Il tubolare esistente non è stato in grado di smaltire la portata di piena eccezionale, e la sua

conseguente rottura ha provocato il totale cedimento del rilevato, completamente asportato dalla forza delle acque.



**Figura 27** Conseguenze dell'errato dimensionamento di un tubolare lungo la S.S. n°389

Infine, nell'11% dei casi analizzati le instabilità sono dovute a difetti di realizzazione, e alla conformazione del terreno nelle scarpate di scavo e di rilevato. Per quanto riguarda la conformazione delle scarpate, si sono verificati casi in cui la pendenza delle stesse, non essendo studiata in funzione delle caratteristiche geotecniche dei terreni, risultava eccessiva: questo ha determinato, in presenza di eventi particolarmente intensi, fenomeni di instabilità delle stesse (crolli, ribaltamenti, scivolamenti). Come nel caso mostrato in figura 28.



**Figura 28** Cedimento della scarpata di scavo lungo la S.S. n° 198

Dall'analisi della casistica presentata è stato possibile dedurre alcune conclusioni:

1. sommando i difetti dovuti all'assenza di opere di presidio idraulico, al cattivo dimensionamento di queste, nonché alla mancanza di manutenzione a cui sono soggette, si è riscontrato come più del 60% delle instabilità riguardanti il solido stradale fosse dovuto all'interazione tra la strada e le acque. Questo ancora una volta

pone l'accento sulla necessità di realizzare un attento studio idrologico e idraulico in fase di progettazione delle strade, nonché di dimensionare opportunamente tutte le opere idrauliche a difesa del corpo stradale.

2. le cause di instabilità riguardanti il solido stradale non possono essere mai ascrivibili ad un unico motivo. Accade infatti che i fenomeni di instabilità siano dati da concorso di più fattori interagenti fra loro: fattori interni, come la geometria del solido stradale, i terreni utilizzati, le opere d'arte esistenti, ma anche fattori esterni, come morfologia e geologia dei suoli, intensità delle precipitazioni, etc.

La fase successiva è stata la realizzazione delle check-list. I passi che hanno portato alla realizzazione delle schede sono stati:

1. individuazione degli elementi costituenti i rilevati e le trincee che possono influire sulla stabilità e sull'affidabilità dello stesso, le indicazioni in tale senso provenivano sia dalla letteratura che dall'analisi di fenomeni di instabilità che hanno interessato le strade della Sardegna;
2. per ogni elemento costituente precedentemente indicato si è valutato un parametro sintetico al variare del quale la vulnerabilità dell'elemento aumentava, facendo conseguentemente aumentare la vulnerabilità complessiva dell'opera;

In alcuni casi questi parametri sono misurabili o valutabili attraverso rilievi di dettaglio (altezza del rilevato, pendenza scarpate, larghezza banchine, ecc). In altri casi è necessario un semplice esame visivo per valutare la classe di vulnerabilità corrispondente (ad esempio per la presenza o l'assenza di opere di presidio idraulico, o per lo stato di manutenzione delle stesse).

## CHECK LIST PER L'ANALISI DI VULNERABILITA' DEI RILEVATI

La stabilità dei rilevati e delle trincee è un concetto relativo e statistico, legato alle caratteristiche del terreno, alle forze di sollecitazione esterne, alle condizioni di vincolo, etc. I componenti del rilevato che sono stati analizzati per la costruzione della check list sono stati:

- ⊗ **Altezza del rilevato:** si può ritenere che per altezze di rilevato superiori ai tre metri sia preferibile interrompere le scarpate dello stesso mediante l'utilizzo di una conformazione a banchettoni. La configurazione a banchettoni permette di aumentare

la superficie di appoggio del rilevato, riducendo le sollecitazioni sul terreno, e in questo modo contribuendo alla stabilità del rilevato. Inoltre la presenza dei banchettoni riduce la velocità di ruscellamento delle acque e diminuisce conseguentemente possibili fenomeni erosivi che si possono innescare sulle scarpate stesse;

- ⊗ **Inclinazione piano campagna:** la pendenza del piano di posa del rilevato influisce sul grado di stabilità dello stesso in quanto che, se essa risulta notevole, si possono generare degli scorrimenti lungo la superficie che separa il terreno di fondazione e il rilevato stesso. Per questa ragione è opportuno utilizzare una configurazione a gradoni qualora tale pendenza risulti superiore a un certo valore. Per quanto attiene il valore di tale pendenze in letteratura si suggerisce che venga utilizzata la conformazione a gradoni qualora essa risulti superiore al 20-25% [60], tuttavia, la normativa CNR UNI 10006 (oggi ritirata e sostituita dalle UNI EN 13242, UNI EN 13285, UNI EN ISO 146888), indica tale pendenza pari al 20%. Ancora il capitolato CIRS, “Norme tecniche di tipo prestazionale per capitolati speciali di appalto” suggerisce la conformazione a gradoni nel caso in cui la pendenza del piano di posa risulti superiore al 15%. Per quanto attiene la configurazione a gradoni la presenza di gradonature contribuisce alla stabilità del rilevato in quanto consente la realizzazione di un ammorsamento tra il terreno di rilevato e quello di fondazione; inoltre permette una facile realizzazione degli strati di terra che andranno a formare il rilevato.
- ⊗ **Natura dei terreni di fondazione:** in linea del tutto generale è possibile rilevare come per la costruzione dei rilevati stradali si abbia bisogno di una fondazione stabile, e questo allo scopo di evitare per quanto possibile eventuali cedimenti, o addirittura vere e proprie rotture del rilevato durante la costruzione dello stesso, anche a distanza di tempo dalla sua ultimazione. Una prima indicazione generale sulla costruzione del solido stradale raccomanda la scelta di terreni poco compressibili, i terreni coerenti, e i pendii non cedevoli. E’ inoltre consigliabile evitare, per quanto risulti possibile, l’attraversamento di terreni argillosi molli o torbosi; questi ultimi infatti se sottoposti all’azione di un carico aggiuntivo (in questo caso il peso del rilevato) subiscono col passare del tempo cedimenti e assestamenti che interesserebbero conseguentemente anche il rilevato, provocando in casi estremi la rottura o l’affondamento dello stesso. Si può quindi affermare che qualora si rilevino terreni di fondazione appartenente ai gruppi A1, A3, A2 (CUR UNI 100006) non

dovrebbero generarsi problemi. Differente e maggiormente critica risulterebbe la situazione qualora si rilevasse al di sotto del piano di posa terreni appartenente ai gruppi A4, A5, A6 e A7, terre quindi classificabili come limo argillose. In questo caso, qualora non fosse possibile evitare che l'infrastruttura attraversi tali terreni, è sempre opportuno realizzare attente indagini per arrivare alla determinazione della soluzione più idonea formulata in base ai risultati delle prove e dei rilievi geognostici.

- ⊗ **Natura dei terreni di rilevato:** la corretta costruzione del rilevato e la sua conseguente stabilità risultano essere, tra gli altri fattori, direttamente legati alla tipologia di materiali utilizzati nonché all'idoneità di compattamento degli stessi. Il capitolato CIRS prevede che, per la formazione dei terreni di rilevato debbano essere utilizzati in ordine di priorità materiali sciolti provenienti dai gruppi A1, A2-4, A2-5, e A3, quindi A2-6, e A2-7.
- ⊗ **Natura dei terreni di sottofondo:** per i terreni da utilizzare nel sottofondo possono essere ripetute le considerazioni sopra esposte. In particolare si può ritenere che terreni appartenenti ai gruppi A1 e A3 siano quelli preferibilmente utilizzabili per la costruzione dei rilevati, e possiedano una vulnerabilità minima. Terre appartenenti ai gruppi A2-4 e A2-5 possono ancora essere utilizzabili e possiedono una vulnerabilità media. Sconsigliabile è invece l'utilizzo di terreni appartenenti ai gruppi A2-6, A2-7, A4, A5, A6, e A7.
- ⊗ **Pendenza delle scarpate di rilevato** : la stabilità del rilevato dipende anche dalla corretta inclinazione assegnata alle sue scarpate. In generale si ritiene che una pendenza di 2/3 rappresenti un giusto compromesso tra ingombro del rilevato e stabilità dello stesso.
- ⊗ **Larghezza delle banchine:** le instabilità a cui può andare incontro un rilevato possono essere dovute a diversi fattori, come la natura dei terreni, la presenza di infiltrazioni di acqua, e il grado di compattazione dello stesso. Per quanto attiene la compattazione questa risulta di difficile realizzazione in prossimità delle scarpate. Ciò influisce anche sulle dimensioni da dare alle banchine le quali, se possiedono una larghezza inferiore a quella minima richiesta, permettono che l'azione dei carichi trasmessi dai veicoli possa provocare abbassamenti della parte più esterna della pavimentazione e conseguentemente la rottura della stessa.

- ⊗ **Protezione delle scarpate:** se le scarpate non sono adeguatamente protette da un manto erboso, l'erosione provocata dalle acque che provengono dalla piattaforma stradale possono provocare smottamenti anche vistosi, soprattutto in presenza di precipitazioni particolarmente intense. Per questa ragione, durante la costruzione del rilevato si dovrà provvedere ad una sistematica e tempestiva protezione delle scarpate. Sempre a protezione delle scarpate e per evitare l'erosione di queste ultime da parte delle acque si dovrà provvedere alla messa in opera di embrici, i quali provvedono a smaltire l'acqua che viene raccolta longitudinalmente dalle cunette, convogliandola al piede della scarpata.
- ⊗ **Opere di presidio idraulico:** i fenomeni di instabilità in molti casi sono provocati dall'azione dell'acqua, o dalla sua interazione con instabilità di altro tipo. Le instabilità provocate dalle acque sotterranee sono tra le principali cause di instabilità del solido stradale. Le acque sotterranee possono essere distinte in acque di falda e acque migranti; queste ultime possono ancora suddividersi in acque che si muovono per effetto della tensione superficiale, e acque che si muovono per elettro-osmosi. Tra gli effetti causati dalle acque di falda rientrano le erosioni più o meno profonde e estese, causate dal trascinamento del materiale, o ancora la plasticizzazione degli strati attraversati che determina avvallamenti, crolli, e instabilità piuttosto vaste. Le acque che si muovono per elettro-osmosi, d'altra parte, nei rilevati possono provocare la plasticizzazione del piano di posa e estese instabilità in tutto il solido stradale. Rientrano tra le cause esterne invece, le instabilità provocate dalle acque piovane (sia superficiali che di infiltrazione), e quelle ancora provocate dai corsi d'acqua. Come già sottolineato le acque superficiali possono produrre erosione della superficie delle scarpate quando non protette, inoltre, penetrando attraverso le fenditure di terreno, possono produrre la fluidificazione degli strati e conseguenti scivolamenti. Per quanto riguarda i corsi d'acqua le instabilità che possono generarsi sono dovute alle erosioni determinate dalle acque dei fiumi o dei torrenti. Le opere consigliabili per le instabilità provocate dalle acque sono tutte quelle che rappresentano il presidio idraulico di un'opera stradale, come drenaggi, fossi di guardia, cunette, tombini, drenaggi longitudinali e trasversali, briglie e difese di sponda.
- ⊗ **Stato di manutenzione opere di presidio idraulico:** lo stato di manutenzione delle opere idrauliche può influire sulla vulnerabilità delle stesse e su quella complessiva

del rilevato. È chiaro infatti che tanto più un'opera è in buone condizioni tanto minore sarà la sua vulnerabilità.

Per sintetizzare i concetti esposti in precedenza, e fornire allo stesso tempo uno strumento per la valutazione della vulnerabilità dei rilevati in caso di eventi di natura idrogeologica si è elaborata la scheda seguente (tabella 7). È chiaro che l'indice di vulnerabilità che deriva dall'applicazione della scheda fornisce semplicemente una misura di vulnerabilità qualitativa, non si presta quindi ad un'analisi di dettaglio delle singole opere o dei singoli tronchi, ma risulta maggiormente utile o per una prima individuazione dei tronchi deboli (come si è detto in precedenza) o eventualmente per un'individuazione delle priorità tra i diversi tronchi giudicati vulnerabili.

Tabella 7 Scheda per la valutazione speditiva della vulnerabilità del rilevato ad eventi idrogeologici

SCHEDA DI VALUTAZIONE SPEDITIVA VULNERABILITA' DEI RILEVATI AD EVENTI IDROGEOLOGICI				
ELEMENTI ANALIZZABILI		CLASSE DI VULNERABILITA'		
		BASSA	MEDIA	ALTA
Altezza rilevato		$h < 3 \text{ m}$	$3 \text{ m} < h < 4 \text{ m}$	$h > 4 \text{ m}$ priva di banchettoni
Inclinazione piano di campagna		$i < 15\%$	$15\% < i < 20\%$	$i > 20\%$ privo di gradonature
Natura terreni di fondazione		terreni appartenenti ai gruppi $A_{1a}$ , $A_{1b}$ , $A_3$ , $A_2$ , stabili e non cedevoli	terreni appartenenti ai gruppi $A_4$ , $A_5$ , $A_6$ e $A_7$ che non hanno subito procedimenti di bonifica o consolidamento, o terreni con instabilità in atto o potenziali	
Natura terreni di rilevato		terreni appartenenti ai gruppi $A_1$ , $A_3$ , $A_{2-4}$ , $A_{2-5}$	Terreni appartenenti ai gruppi $A_{2-6}$ , $A_{2-7}$	terreni appartenenti ai gruppi $A_4$ , $A_5$ , $A_6$ , $A_7$ non sottoposti a processi di stabilizzazione
Natura terreni di sottofondo		terreni appartenenti ai gruppi $A_1$ , $A_3$	Terreni appartenenti ai gruppi $A_{2-4}$ , $A_{2-5}$	terreni appartenenti ai gruppi $A_{2-6}$ , $A_{2-7}$ , $A_4$ , $A_5$ , $A_6$ , $A_7$
Pendenza scarpate di rilevato		pendenza $< 2/3$	pendenza $= 2/3$	pendenza $> 2/3$
Larghezza banchine		larghezza $> 1 \text{ m}$	$0,5 \text{ m} < \text{larghezza} < 1 \text{ m}$	larghezza $< 0,5 \text{ m}$
Protezione delle scarpate		scarpate inerbite, dotate di embrici in buono stato di manutenzione	scarpate inerbite, dotate di embrici in cattivo stato di manutenzione	scarpate non protette
Opere di presidio idraulico	acque sotterranee	presenza di drenaggi longitudinali e trasversali	assenza di drenaggi longitudinali e trasversali	
	acque superficiali	presenza di fossi di guardia, cunette, opere di presidio idraulico	assenza di fossi di guardia, cunette, opere di presidio idraulico	
Manutenzione opere idrauliche		buono stato di manutenzione	cattivo stato di manutenzione	



## CHECK LIST PER L'ANALISI DI VULNERABILITA' DELLE TRINCEE

Per la valutazione della vulnerabilità delle trincee in molti casi può essere ripetuto quanto precedentemente esposto per i rilevati. Si può tuttavia affermare come la stabilità di una strada in trincea, o a mezza costa, fondamentalmente dipenda dalla stabilità stessa dei terreni su cui è costruita. Perciò possiederà una vulnerabilità elevata in caso di pendii instabili, cedevoli, o interessati in passato da fenomeni franosi. Per la valutazione della vulnerabilità delle trincee, gli elementi che sono stati ritenuti importanti sono i seguenti:

- ⊗ **Inclinazione piano di campagna:** tra le instabilità che riguardano il solido stradale alcune sono dovute a cause interne o predisponenti, come ad esempio la pendenza del terreno [60]. La pendenza del terreno deve sempre essere tenuta in conto in quanto l'azione di gravità è ritenuta tra le maggiori responsabili dei movimenti. Tuttavia la pendenza del terreno non va considerata come una causa singola, ma eventualmente accessoria, in concomitanza con altre. Uno studio svolto dall'Università degli Studi di Cagliari [20], attraverso una simulazione agli elementi finiti, analizza la stabilità di una trincea, in relazione al variare degli elementi della sua geometria, come la pendenza del terreno, la pendenza della scarpata, la profondità dello scavo, e del basamento roccioso, e la densità dell'ammasso terroso, calcolando per le diverse combinazioni possibili, gli spostamenti, le tensioni e le deformazioni. I risultati delle simulazioni condotte hanno mostrato che, al crescere della pendenza del terreno, le tensioni tangenziali aumentano di circa il 60%; analogamente aumenta l'area di influenza delle stesse.
- ⊗ **Natura dei terreni di fondazione:** Nei tratti in trincea è sempre necessario effettuare indagini geognostiche tese a definire compiutamente le caratteristiche geotecniche dei terreni nei quali viene effettuato lo scavo. I rilievi così effettuati serviranno sia a definire le caratteristiche dei terreni per il loro eventuale utilizzo nella costruzione dei rilevati e dei sottofondi, sia a valutare la massima pendenza che è possibile assegnare alle scarpate di scavo. Per questa ragione una prima indicazione generale sulla costruzione del solido stradale raccomanda la scelta di terreni poco compressibili, i terreni coerenti, e i pendii non cedevoli. Si ricorda infatti che l'apertura di trincee rappresenta una delle cause di instabilità esterne, e può generare scorrimenti e scivolamenti dovuti allo squilibrio dei carichi su superfici esistenti o di neoformazione. Altre condizioni di instabilità possono essere prodotte

dall'interruzione di un banco impermeabile a causa del taglio effettuato da una trincea. In questi casi può accadere che l'acqua di falda o meteorica raggiunga la parte superiore del banco sottostante, riducendone l'attrito e la coesione e determinando gli spostamenti dello strato superiore [60]. E' inoltre consigliabile evitare per quanto risulti possibile l'attraversamento di terreni argillosi molli o torbosi. Vale perciò quanto detto approposito dei terreni di rilevato.

- ⊗ **Natura dei terreni di sottofondo:** valgono le considerazioni sopra esposte per i rilevati.
- ⊗ **Altezza della trincea:** per quanto attiene la vulnerabilità connessa all'altezza dello scavo si fa riferimento al lavoro di Coni e al. [20]. La simulazione condotta ha mostrato come la distribuzione delle tensioni tangenziali risulti decisamente influenzata dall'altezza dello scavo. In particolare, supponendo una pendenza del terreno inferiore al 20% la distribuzione delle tensioni tangenziali si incrementa del 50% passando da una profondità di 5 m a una profondità di 15 m. L'altezza dello scavo non deve essere considerata come una causa determinante per la formazione dei fenomeni di instabilità, ma deve essere considerata come una concausa, legata ad altri fattori.
- ⊗ **Geometria e geologia delle scarpate:** molti dei problemi riguardanti la stabilità delle trincee riguardano la definizione del profilo che deve essere assegnato alle scarpate. Nelle sezioni in trincea la pendenza non può essere definita a priori, ma valutata di caso in caso, in quanto dipendente dalle caratteristiche geotecniche dei terreni attraversati. La problematica deve essere affrontata diversamente, a seconda che si analizzino rocce lapidee o rocce sciolte [30].

In presenza di rocce lapidee il franamento delle scarpate può essere dovuto alla presenza di superfici di discontinuità e di superfici di frattura. La pendenza delle scarpate quindi, in presenza di rocce stratificate dipenderà da due fattori fondamentali: l'angolo di attrito tra strato e strato e l'angolo formato dal piano di giacitura degli strati con l'orizzontale. Se indichiamo con  $\mathbf{f}$  l'angolo di attrito tra strato e strato (pari circa a  $30^\circ$ ), con  $\mathbf{b}$  l'angolo formato dall'orizzontale con le superfici di discontinuità, e con  $\mathbf{a}$  l'angolo di inclinazione della scarpata possono presentarsi due differenti casi:

- se l'angolo di attrito è superiore all'angolo di inclinazione delle discontinuità ( $\beta < \mathbf{f}$ , ovvero  $< 30^\circ$ ), la scarpata può essere disposta anche verticalmente. [30];
- se l'angolo di attrito è inferiore all'angolo di inclinazione delle discontinuità ( $\beta > \mathbf{f}$ , ovvero  $> 30^\circ$ ), la pendenza della scarpata deve essere inferiore a quella degli strati rocciosi

Nel caso di rocce sciolte la stabilità dei pendii localizzati in trincea può essere espressa mediante il coefficiente di sicurezza del pendio  $F_s$ , valutabile attraverso diversi metodi che si possono trovare in letteratura. La scelta del valore del coefficiente di sicurezza da utilizzare nelle verifiche di stabilità dei pendii richiede un giudizio critico da parte dell'ingegnere geotecnico, poiché sono molti i fattori di cui tenere conto. La normativa italiana in vigore (D.M. LL.PP. 11/03/88) prescrive che *“Nel caso di terreni omogenei e nei quali le pressioni neutre siano note con sufficiente attendibilità, il coefficiente di sicurezza non deve essere minore di 1,3. Nelle altre situazioni il valore del coefficiente di sicurezza da adottare deve essere scelto caso per caso, tenuto conto principalmente della complessità strutturale del sottosuolo, delle conoscenze del regime delle pressioni neutre e delle conseguenze di un eventuale fenomeno di rottura”*. Altri autori [60] riportano che, affinché la scarpata possa ritenersi stabile, il coefficiente, preferibilmente, non dovrebbe essere inferiore a 1.4, per terreni con scarsa suscettività all'acqua, e non inferiore a 2.00 per terreni prevalentemente coesivi.

⊗ **Protezione scarpate e pendii** : la presenza di opere di contenimento del pendio riduce chiaramente la vulnerabilità delle scarpate di rilevato. I provvedimenti che si possono adottare per ridurre le forze di rottura hanno come principio fondamentale quello di ridurre gli sforzi tangenziali lungo la superficie di scivolamento, o il trasferimento degli sforzi ad elementi strutturali fondati o ancorati su strati del terreno sottostante stabili e non interessati dal dissesto. Tra i provvedimenti di tale tipo si indicano:

- operazioni di disgaggio, abbattimento della scarpata, realizzazione di scavi di alleggerimento sulla sommità del pendio;

- muri di sostegno;
- sistemi di pali, ancoraggi pesanti, paratie e parancolate, chiodature.

Per quanto riguarda la seconda categoria di opere, esse agiscono secondo diversi principi fisici: aumentando gli sforzi normali totali lungo la superficie di scivolamento, riducendo le pressioni neutre nei punti interni o lungo il contorno, o ancora migliorando la resistenza al taglio del materiale. Sono provvedimenti che rientrano all'interno di questa categoria:

- uso di tiranti pretesi o applicazione di elementi strutturali;
- sistemi di allontanamento delle acque superficiali e drenaggi;
- procedimenti di elettro-osmosi;
- procedimenti tesi a migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno, come iniezioni cementizie o chimiche, trattamenti termici (congelamento o cottura) etc.

- ⊗ **Opere di presidio idraulico:** quanto detto per le instabilità provocate sul rilevato dalle acque superficiali può essere ribadito anche per le trincee.
- ⊗ **Stato di manutenzione opere di presidio idraulico:** quanto detto per i rilevati può essere ribadito anche per le trincee.

Tabella 8 Scheda per la valutazione speditiva della vulnerabilità delle trincee ad eventi idrogeologici

SCHEDA DI VALUTAZIONE SPEDITIVA VULNERABILITA' DELLE TRINCEE AD EVENTI IDROGEOLOGICI				
ELEMENTI ANALIZZABILI		CLASSE DI VULNERABILITA'		
		BASSA	MEDIA	ALTA
Inclinazione piano di campagna (pendenza terreno Pt)		Pt<15%	15%<Pt<30%	Pt>30%
Natura terreni di fondazione		terreni appartenenti ai gruppi A <sub>1a</sub> , A <sub>1b</sub> , A <sub>3</sub> A <sub>2</sub> , stabili e non cedevoli	terreni appartenenti ai gruppi A <sub>4</sub> , A <sub>5</sub> , A <sub>6</sub> e A <sub>7</sub> che non hanno subito procedimenti di bonifica o consolidamento, o terreni con instabilità in atto o potenziali	
Natura terreni di sottofondo		terreni appartenenti ai gruppi A <sub>1</sub> , A <sub>3</sub>	Terreni appartenenti ai gruppi A <sub>2-4</sub> , A <sub>2-5</sub>	terreni appartenenti ai gruppi A <sub>2-6</sub> , A <sub>2-7</sub> A <sub>4</sub> , A <sub>5</sub> , A <sub>6</sub> , A <sub>7</sub>
Altezza trincea (h)		h < 5 m	5 m < h < 10 m	h > 10 m
Geometria e geologia scarpate	rocce lapidee	-Inclinazione strati < 30°  -Inclinazione strati > 30° e inclinazione scarpata inferiore a quella degli strati	-Scarpate con processi franosi in atto  -Inclinazione strati > 30° e inclinazione scarpata maggiore o uguale a quella degli strati	
	rocce sciolte (coefficiente di sicurezza del pendio, Fs)	FS>2	2<FS<1,3	FS<1,3
Protezione scarpate e pendii		pendii con instabilità potenziale o in atto con opere di protezione in buono stato di manutenzione	pendii con instabilità potenziale o in atto con opere di protezione in cattivo stato di manutenzione	pendii con instabilità potenziale o in atto privi di opere di protezione
Opere di presidio idraulico	acque sotterranee	presenza di drenaggi, o di altri provvedimenti atti a limitare l'azione delle acque sotterranee	assenza di drenaggi, o di altri provvedimenti atti a limitare l'azione delle acque sotterranee	
	acque superficiali	presenza di fossi di guardia, cunette, opere di presidio idraulico, protezione delle scarpate	assenza di fossi di guardia, cunette, opere di presidio idraulico, protezione delle scarpate	
Manutenzione opere idrauliche		buono stato di manutenzione	cattivo stato di manutenzione	

## BIBLIOGRAFIA:

- [1] Agostinacchio, M. Ciampa, D. Olita, S. (2003) – *La progettazione delle strade, guida pratica alla corretta applicazione del D.M. 5/11/2001* – EPC Libri, Roma, Italy.
- [2] Annunziata, F. Coni, M. Maltinti, F. Pinna, F. Portas, S. (2004) - *Progettazione Stradale Integrata* - Zanichelli, Bologna, Italy.
- [3] Annunziata, F. Bianchini, B. Caporaso, F. Caraffa, T. Melis, D., (2006) – “*Parametri ed indicatori relativi alla viabilità di interesse per la protezione civile*” – Comitato Tecnico 4.1 “Gestione del patrimonio stradale” Associazione Nazionale della Strada – AIPCR – Comitato Nazionale Italiano - XXV Convegno Nazionale Stradale, Napoli.
- [4] Bell, M. G. H. (2000) – *A game theory approach to measuring the performance reliability of transport networks* – Transportation Research part B, 34, pagg. 533, 545. .
- [5] Benedetto, A. Cosentino, C. (2001) - *Il preannuncio meteorologico per la gestione delle reti viarie in condizioni di emergenza* - Atti XI Convegno Nazionale SIIV, Società Italiana Infrastrutture Viarie “Progettazione ed adeguamento funzionale delle infrastrutture viarie. Occasioni di recupero dell’ambiente e di contributo per la protezione civile, Verona, Italy.
- [6] Benedini, M. Gisotti, G. (1985) – *Il dissesto idrogeologico: cause effetti e interventi a difesa del suolo* – Arti grafiche Editoriali S.r.L. Urbino, Italy.
- [7] Berdica, K. (2002) – *An Introduction To Road Vulnerability: What Has Bedone, Is Done, And Should Be Done* – , Transport Policy 9 (2).
- [8] Berdica, K. Eliasson, J. (2004) – *Regional accessibility analysis from a vulnerability perspective*, - 2nd International Symposium on Transportation Network Reliability. Queeston and Christchurch, New Zealand, p 89 – 95.
- [9] Bleukx, A. Stada, J.E. Immers, B. (2005) – *The effect of network layout on the reliability of travel time* – 3rd International SIIV Congress “People, Land, Environment and Transpor Infrastructures - Reliability and development.” (Session C1 “Network reliability”) – Bari, Italy.
- [10] Bosurgi, G. D’Andrea, A. Pellegrino, O. (1999) - *Vulnerability Of Road Networks Following Severe Hydrogeological Events-*. PIARC XXI World Road Congress – Kuala Lumpur.
- [11] Bosurgi, G. D’Andrea, A. Pellegrino, O. Trifirò, F. (2001) - *Una procedura sistemica per la valutazione dei fattori di importanza delle variabili di rischio idrogeologico* - Atti XI Convegno Nazionale SIIV, Società Italiana Infrastrutture Viarie “Progettazione ed adeguamento funzionale delle infrastrutture viarie. Occasioni di recupero dell’ambiente e di contributo per la protezione civile”, Verona, Italy.
- [12] Cafiso, S. Condorelli, A. D’Andrea, A. (1999)- *Evaluation of seismic risk on road infrastructures* - PIARC XXI World Road Congress, - Kuala Lumpur.
- [13] Cafiso, S. Colombritta, R. D’Andrea, A. Mussumeci, G. Colombritta, E. Condorelli, A. (2001) - *Un modello GIS per la valutazione del rischio sulle infrastrutture stradali nelle emergenze della protezione civile*, - Atti XI Convegno Nazionale SIIV, Società Italiana Infrastrutture Viarie “Progettazione ed adeguamento

funzionale delle infrastrutture viarie. Occasioni di recupero dell'ambiente e di contributo per la protezione civile", Verona, Italy.

[14] Cafiso, S. Condorelli, A. Mussumeci, G. (2006) - *Valutazione del rischio sismico di infrastrutture viarie urbane: analisi funzionale della rete in condizioni di emergenza* - In "Metodologie di valutazione del rischio sismico sulle infrastrutture viarie" Comitato Tecnico 3.2 "Gestione dei rischi legati alle strade" Associazione Nazionale della Strada - AIPCR - Comitato Nazionale Italiano - XXV Convegno Nazionale Stradale, Napoli, 4-7 ottobre, pagg. 69-104

[15] Campos, V. B. G. da Silva, P.A. L. Netto, P.O.B. (1999) - *Evacuation transport planning: a method to identify optimal independent routes* - Fifth International Conference on Urban Transport and the Environment for the 21st Century, Island of Rhodes, Greece.

[16] Campos, V. B. G. da Silva, P.A. L. (2004) - *A method for evaluating the operational reliability of a transportation network* - 2<sup>nd</sup> International Symposium on Transportation Network Reliability. Queeston and Christchurch, New Zealand, p 218 – 223.

[17] Chang, E.S. Nojima, N. (2001) – *Measuring post disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative persective* – Transportation Research part A, volume 35, pagg. 475, 494.

[18] Chang, E.S. (2003) - *Transportation planning for disasters: an accessibility approach*- Environment and Planning A, volume 35, pagg. 1051, 1072.

[19] Cipolla, F. Sebastiani, C. (1998) - *Linee guida per la predisposizione del piano comunale di protezione civile Rischio Idrogeologico* - CNR Gruppo Nazionale per la difesa delle catastrofi idrogeologiche, Tipografia Arti grafiche Lux .

[20] Coni, M. Maltinti, F. Mameli, S. (2000) – *Infrastrutture viarie e dissesti del territorio. Simulazione FEM della stabilità del solido stradale in trincea* – atti del convegno INFRAVIA, mostra- convegno sulle infrastrutture di trasporto terrestre, Verona, Italy.

[21] Cova, T. J. Church, R. L., (1997) - *Modelling community evacuation vulnerability using GIS* - Internationa Journal of Geographical Information Science, 11, n° 8, p. 763 – 784.

[22] Cova, T. J. Conger, S. (2004) - *Transportation Hazards* – in Handbook of Transportation Engineering, M. Kutz (ed), McGraw Hill, New York, pp. 17.1-17.24.

[23] Cova, T. (2005) - *GIS in Emergency Management* - in "Geographical Information Systems, principles, techniques, management and applications" Eds Longley, P.A. Goodchild, M.F. Maguire, D.J. Rhind, D.W (John Wiley & Sons) United States of America.

[24] Crispino, M. Gattinoni, P. Papini, M. (2001) – *Linee guida per la valutazione del rischio geologico lungo le infrastrutture viarie* – Atti XI Convegno Nazionale SIIV, Società Italiana Infrastrutture Viarie "Progettazione ed adeguamento funzionale delle infrastrutture viarie. Occasioni di recupero dell'ambiente e di contributo per la protezione civile", Verona, Italy.

[25] Cutter, S. L. Michell, J. T. Scott, M. S. (2000) - *Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina* - Annals of the Association of American Geographers 11, p. 713 – 737.

- [26] Dalziell, E. (2004) - *Assessing natural hazard risk across a geographically dispersed road network* - 2<sup>nd</sup> International Symposium on Transportation Network Reliability. Queeston and Christchurch, New Zealand, p 175 – 180.
- [27] D'Andrea, A. Condorelli, A. a cura di (2006) - *Metodologie di valutazione del rischio sismico sulle infrastrutture viarie* - Comitato Tecnico 3.2 “Gestione dei rischi legati alle strade” Associazione Nazionale della Strada – AIPCR – Comitato Nazionale Italiano - XXV Convegno Nazionale Stradale, Napoli, 4-7 ottobre.
- [28] D'este, G.M.D. Taylor, M.A.P. (2003) - *Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of National Strategic Transport Networks* - The network reliability of transport, proceedings of the 1<sup>st</sup> international symposium on transportation network reliability. Edited by Michael G. Bell and Yasunori Iida, Pergamon, Oxford pagg. 22-44.
- [29] Di Gangi, M. Luongo, A. (2005) – *Transportation network indicators for risk evaluation and exposure reduction* – Proceeding of the European transport conference (ETC 2005), Strasbourg, France.
- [30] Ferrari, P. Giannini, F.(1987) – *Ingegneria stradale, corpo stradale e pavimentazioni vol II* – ISEDI, Torino.
- [31] *Final Report On Natural Disaster Reduction For Roads* Prepared by piarc/working group G2 “natural disaster reduction”. Rapport of the committee to the XXI world road congress, Kuala Lumpur, 1999.
- [32] Husdal, J. (2004) *Reliability and vulnerability versus cost and benefits*, 2<sup>nd</sup> International Symposium on Transportation Network Reliability. Queeston and Christchurch, New Zealand, p 180 – 186.
- [33] Husdal, J. (2005) – *The vulnerability of road networks in a cost-benefit perspective* – Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C., U.S.A.
- [34] Husdal, J. (2006) - *Transportation network vulnerability- wich terminology and metrics should we use?* – 1<sup>st</sup> Seminar Nectar Cluster, Molde University College, Molde (Norway).
- [35] Jenelius, E. Mattsson L. (2006a) – *Developping a methodology for a road network vulnerability analysis*. – 1<sup>st</sup> Seminar Nectar Cluster, Molde University College, Molde (Norway).
- [36] Jenelius, E. Petersen, T. Mattsson L. (2006b) – *Importance and exposure in road network vulnerability analysis* – Transportation Research part A, 40, pagg. 537, 560. .
- [37] Keller, G. (2002) - *Rural Road Vulnerability Reduction Assessment, Mitigation Measures, and Training* - Natural Hazard Review.
- [38] Keller, G. Sherar, J. (2003) - *Low-Volume Roads Engineering Best Management Practices Field- Guide* By USDA, Forest Service.
- [39] Li, Yan (2004) – *Measuring individual residence's accessible probability by using Geographical Information Systems*. - 2<sup>nd</sup> International Symposium on Transportation Network Reliability. Queeston and Christchurch, New Zealand, p 239 – 244.
- [40] Longley, P.A. Goodchild, M.F. Maguire, D.J. Rhind, D.W. (2005) – *Geographical Information Systems, principles, techniques, management and applications* – John Wiley & Sons, Hoboken, United States of America.



- [41] Lovas, G.G. (1998) – *On the importance of building evacuation system components* – Transactions on engineering management, vol 45, n° 2, pp 181- 191.
- [42] Maltinti, F. Portas, S. Annunziata, F. (2000) - *Soluzioni progettuali per il ripristino delle condizioni idrogeologiche preesistenti alla costruzione di un rilevato stradale*. - Atti del X Convegno SIIV Infrastrutture viarie del XXI secolo: classificazione e riqualificazione dell'esistente- progetto delle nuove vie, Acireale , Italy.
- [43] Maltinti, F. Ruggieri, F. Annunziata F. (2001) - *Criteri e tecniche di progettazione delle infrastrutture viarie per la prevenzione dei dissesti e la tutela del territorio* - Atti XI Convegno Nazionale SIIV, Società Italiana Infrastrutture Viarie “Progettazione ed adeguamento funzionale delle infrastrutture viarie. Occasioni di recupero dell’ambiente e di contributo per la protezione civile, Verona, Italy
- [44] Maltinti, F. (2002) – “*La progettazione delle infrastrutture di trasporto nell’obiettivo della salvaguardia degli equilibri naturali*” – Tesi di Dottorato di ricerca in Ingegneria del Territorio, XIV ciclo.
- [45] Maltinti, F. Cecere, E. Annunziata, F. (2006) - *La riqualificazione funzionale di un sistema viario: obiettivi e priorità di intervento* - STRADE & AUTOSTRADE, n° 55 – Anno X/n° 1 – gennaio/febbraio 2006.
- [46] Maltinti, F. (2007) – “*Numerical analysis to define the optimum inclination of embankment slopes*” – 5rd International SIIV Congress “Advances in transportation infrastructures and stakeholders expectations”, session A2 “Management”. Palermo, Italy.
- [47] Melis, D. Maltinti, F. – “*Methodology to assess vulnerability of roads under hydrogeological events*” – 5rd International SIIV Congress “Advances in transportation infrastructures and stakeholders expectations”, session A2 “Management. Palermo, Italy.
- [48] Menoni, S. Pergalani, F. Boni, M.P. Petrini, V. (2002) – *Lifelines earthquake vulnerability assessment: a systemic approach* – Soil dynamics and earthquake engineering, 22, pagg. 1199, 1208.
- [49] Nicholson, A. J. Du, Z.P. (1997) – *Degradable transportation systems: an intergrated equilibrium model* – Transportation Research part B, vol 31, n° 3, pp 209-223.
- [50] Nicholson, A. J. Dalziel E.P. (2005) – Assessing and mitigating the impacts of road network unreliability – 3rd International SIIV Congress “People, land environment and transportation infrastructures, reliability and development”. Bari, Italy.
- [51] Odeh, D. J. M. ASCE, P.E. (2001) - *Natural Hazard Vulnerability Assessment For Statewide Mitigation Planning In Rhode Island* - Natural Hazard Review.
- [52] Piarc Working Group2 “Natural Disaster Reduction” (1999) - *Natural Disaster Reduction For Roads* - Rapport of the commitee to the XX World Road Congress, Montreal.
- [53] Regione Autonoma della Sardegna (2005) – *Progetto IFFI, inventario dei fenomeni franosi in Italia, Regione Sardegna, Relazione Tecnico Scientifica ed illustrativa* - Cagliari.
- [54] Regione Autonoma della Sardegna, Assessorato ai Lavori Pubblici (2004) – *Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico, PAI, Relazione Generale* - Cagliari.

- [55] Simoni, A. Testaguzza, P. (2001) - *Anas – Protezione Civile: accordo per gestire le calamità*, LE STRADE, n° 1365, 1-2.
- [56] Sohn, J (2006) – *Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: an accessibility approach*. – Transportation Research Part A, 40, pagg. 491-506.
- [57] Sumalee, A. Watling, D. (2004) – *Evaluating travel time reliability with multi-mode and dependent link failure: partition algorithm and stratified Monte Carlo Approach* - 2<sup>nd</sup> International Symposium on Transportation Network Reliability. Queeston and Christchurch, New Zealand, p 153 – 159.
- [58] Taylor, M. A. P. D’Este, G. M. (2003) – *Concepts of network vulnerability and applications to the identification of critical element of transportation infrastructure* - 26<sup>nd</sup> Australasian Transport Research Forum. Wellington, New Zealand, 1-3 October.
- [59] Taylor, M. A. P. D’Este, G. M. (2004) – *Critical infrastruictiure and transport network vulnerability: developping a method for diagnosis and assessment*. - 2<sup>nd</sup> International Symposium on Transportation Network Reliability. Queeston and Christchurch, New Zealand, p 96 – 102.
- [60] Tesoriere, G. (1984) – *Strade ferrovie e Aeroporti, opere in terra e soprastrutture*, vol II – UTET, Torino.
- [61] Tesoriere, G. Giunta, M. Russello, M. (2001) - *Analisi della vulnerabilità delle reti stradali in aree soggette a rischio sismico*, - Atti XI Convegno Nazionale SIIV, Società Italiana Infrastrutture Viarie “Progettazione ed adeguamento funzionale delle infrastrutture viarie. Occasioni di recupero dell’ambiente e di contributo per la protezione civile”, Verona, Italy .
- [62] Visser, J. Molenkamp, L. (2004) – *Vulnerability quick scan of a national road network* – 2<sup>nd</sup> International Symposium on Transportation Network Reliability. Queeston and Christchurch, New Zealand, p 96 – 102.
- [63] Waters, N. M. (2005) - *Transportation GIS: GIS T*, - in “Geographical Information Systems, principles, techniques, management and applications” Eds Longley, P.A. Goodchild, M.F. Maguire, D.J. Rhind, D.W (John Wiley & Sons) United States of America.

## LEGGI

- Legge n°183 del 18/06/1989 “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”;
- Legge n°267 del 03/08/1998 “Conversione in legge, con modificazioni del decreto legge 11 giugno 1998, n°180, recante misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania”;
- D.P.C.M. 29/09/1998 “Atto di indirizzo e di coordinamento per l’individuazione dei criteri relativi agli adempimenti di cui all’articolo 1, commi 1 e 2, del decreto-legge 11 giugno 1998, n°180”;
- Norme per gli interventi di adeguamento delle strade esistenti, bozza del 20.03.2006, Commissione per la predisposizione di nuove norme per gli interventi di adeguamento delle strade esistenti.

- DM LL PP 11/03/08 – “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione” – .
- CNR – UNI 10006 “Costruzione e manutenzione delle strade, tecnica di impiego delle terre”
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”, D.M. 5 novembre 2001.
- Capitolato CIRS, Norme tecniche di tipo prestazionale per Capitolati Speciali di Appalto, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ispettorato per la Circolazione e la Sicurezza Stradale, anno 2001.

#### INTERNET

- [www.risk.ue.it](http://www.risk.ue.it)
- [www.tfhr.gov](http://www.tfhr.gov)
- [www.asce.org](http://www.asce.org)
- [www.cscnoaa.gov](http://www.cscnoaa.gov)
- [www.piarc.org](http://www.piarc.org)
- [www.centroprociv.it](http://www.centroprociv.it)
- [www.ispro.it](http://www.ispro.it)
- [www.laprotezionecivile.com](http://www.laprotezionecivile.com)

